

Simulação computacional de escoamentos atmosféricos sobre regiões montanhosas através de aplicação comercial - FLUENT

Rui Sérgio Barros de Moura

Relatório do projecto final

Orientadores:

Professor José Manuel Laginha Mestre da Palma

Dr. Carlos Miguel Pereira da Silva Santos



**Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica**

Julho de 2009

Resumo

A caracterização do escoamento atmosférico sobre regiões montanhosas é de extrema importância para a instalação de um parque eólico. As técnicas usadas para esse efeito recorrem à medição de velocidade, desvio padrão, velocidade máxima e direcção de vento por períodos de duração mínima de um ano, em um ou dois pontos. Esta cobertura espacial pode ser insuficiente para caracterizar áreas extensas, sendo necessário recorrer a aplicação comercial como o FLUENT.

Neste trabalho inicialmente foram realizadas simulações para uma zona montanhosa de Portugal continental com malhas grosseiras, numa fase de aprendizagem na utilização do FLUENT, onde é apresentado o processo de geração de malha com o software GAMBIT, as opções oferecidas pelo FLUENT, o efeito do refinamento da malha nos resultados finais.

O passo seguinte foi a simulação para direcções de vento dominantes, que coincidem com o sector Noroeste e Sudeste, para malhas mais refinadas. Os campos, perfis e valores pontuais de velocidade, de intensidade turbulenta, inclinação vertical foram analisados para uma zona do terreno onde um parque eólico será instalado. Também foi avaliada a validade dos resultados das simulações recorrendo ao cálculo de erros relativos.

Os aerogeradores WTG 6, 7 e 8 revelaram-se mais problemáticos na análise dos campos, perfis e valores pontuais. A intensidade turbulenta apresenta erros relativos maiores do que a velocidade e direcção.

Abstract

The characterization of the atmospheric flow over mountainous regions is very important for the installation of a wind farm. The techniques used for this purpose using the measurement of speed, standard deviation, maximum speed and direction of wind for periods of at least one year in one or two points. This coverage may be insufficient space to characterize extensive areas, being necessary to use commercial applications such as Fluent.

In this work was initially performed simulations for a mountainous area of mainland Portugal with coarse meshes, a phase of learning in the use of Fluent, which is shown the process of generating a mesh with the software Gambit, the options offered by Fluent, the effect of refinement the mesh in the final results.

The next step was to simulate the dominant directions of wind, which coincide with the area northwest and southeast, for more refined meshes. Fields, profiles and values of velocity, turbulent intensity, vertical inclination were assessed for an area of land where a wind farm will be installed. Was also evaluated the validity of the results of simulations using the calculation of relative errors.

The WTG wind turbines 6, 7 and 8 proved to be more problematic in the analysis of the fields, profiles and values. The turbulent intensity shows relative errors greater than the speed and direction.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer ao Prof. José Laginha Palma, pelo acompanhamento, incentivo, trabalho de revisão desta tese e conhecimentos transmitidos.

Ao Dr. Carlos Silva Santos pela orientação, acompanhamento e recomendações prestadas ao longo deste trabalho

Ao António Oliveira pela ajuda no trabalho realizado e pela amizade demonstrada.

Ao Vítor Gomes pelos conselhos e a ajuda na simulação computacional.

Conteúdo

1	Introdução	12
1.1	Objectivos	12
1.2	Descrição breve dos capítulos	13
2	Modelo computacional	14
2.1	Equações de conservação: massa e quantidade de movimento	14
2.2	Modelo de turbulência k- ϵ padrão	14
2.3	Modelo de turbulência k- ϵ padrão modificado	15
2.4	Conclusão do modelo matemático	16
2.5	Técnica dos volumes finitos	16
2.5.1	Discretização dos termos convectivos	16
3	Cálculos preliminares	18
3.1	Introdução	18
3.2	Descrição da topografia	19
3.3	Simulação para a direcção norte-sul	20
3.3.1	Pré-Processamento	21
3.3.1.1	Funções de parede para superfícies rugosas	22
3.3.1.2	Perfil de velocidades	23
3.3.1.3	Condições de fronteira	24
3.3.2	Pós-processamento	25
3.4	Simulação do escoamento atmosférico para outras direcções	27
3.4.1	Pré-processamento	27

3.4.2	Pós-processamento	28
3.5	Conclusões	31
4	Modelação final	32
4.1	Descrição do problema	32
4.2	Condições de fronteira	33
4.2.1	Condições de entrada	33
4.2.2	Parâmetros do escoamento atmosférico	34
4.3	Validação do modelo	35
4.3.1	Filtragem de dados experimentais	35
4.3.2	Análise de erros	36
4.4	Análise dos campos em função da topografia	39
4.4.1	Campos de velocidade	40
4.4.2	Campos de inclinação vertical	41
4.4.3	Campos de intensidade turbulenta	42
4.5	Análise dos perfis e de valores pontuais	43
4.5.1	Perfis e valores pontuais de velocidade	44
4.5.2	Perfis e valores pontuais de inclinação vertical	45
4.5.3	Perfis e valores pontuais de intensidade turbulenta	46
4.5.4	Perfis e valores pontuais de <i>shear factor</i>	48
4.6	Convergência	50
5	Conclusões	52
A	Funções Matlab	55
B	Campos	57
C	Perfis	79
D	Valores pontuais para cada aerogerador	99
E	Erros relativos e tamanho das amostras tabelados	113

Lista de Figuras

3.1	Topografia do terreno	19
3.2	Apresentação espacial dos aerogeradores	20
3.3	Malha gerada no gambit	22
3.4	Representação gráfica dos resíduos	26
3.5	Campo de velocidades e de intensidade turbulenta para a malha de 20x20x10	26
3.6	Campo de velocidades e de intensidade turbulenta para a malha 80x80x20	27
3.7	Campos de velocidade e de intensidade turbulenta para a direcção 112,5°	29
3.8	Campos de velocidade e de intensidade turbulenta para a direcção 135°	29
3.9	Campos de velocidade e de intensidade turbulenta para a direcção 292,5°	30
3.10	Campos de velocidade e de intensidade turbulenta para a direcção 315°	30
4.1	Rosas dos ventos da P042 para 30 metros de altura	33
4.2	Viscosidade turbulenta em função da altura	35
4.3	Campo de velocidades para a direcção 105° a 44 metros de altura	41
4.4	Campo de velocidades para a direcção 142,5° a 126 metros de altura	41
4.5	Campo de inclinação vertical para a direcção 307,5° a 85 metros de altura	42
4.6	Campo de intensidade turbulenta para a direcção 135° a 44 metros de altura	43
4.7	Perfis de velocidade no aerogerador WTG 4 para o sector Sudeste	44
4.8	Perfis de velocidade no aerogerador WTG 6 para o sector Sudeste	45
4.9	Perfis de inclinação vertical no aerogerador WTG 3	45
4.10	Perfis de intensidade turbulenta no aerogerador WTG 6 para o sector Sudeste	47
4.11	Perfis de intensidade turbulenta no aerogerador WTG 1 para o sector Noroeste	48
4.12	Perfis de <i>shear factor</i> no aerogerador WTG 7 para o sector Sudeste	48

4.13	Perfis de <i>shear factor</i> no aerogerador WTG 2 para o sector Noroeste	49
4.14	Evolução dos resíduos com o numero de iterações para 105°	51
B.1	Campos de velocidade (m/s) para as direcções 105° e 112,5°	59
B.2	Campos de velocidade (m/s) para as direcções 120° e 127,5°	60
B.3	Campos de velocidade (m/s) para as direcções 135° e 142,5°	61
B.4	Campos de velocidade (m/s) para as direcções 285° e 292,5°	62
B.5	Campos de velocidade (m/s) para as direcções 300° e 307,5°	63
B.6	Campos de velocidade (m/s) para as direcções 315° e 322,5°	64
B.7	Campos de inclinação vertical (°) para as direcções 105° e 112,5°	66
B.8	Campos de inclinação vertical (°) para as direcções 120° e 127,5°	67
B.9	Campos de inclinação vertical (°) para as direcções 135° e 142,5°	68
B.10	Campos de inclinação vertical (°) para as direcções 285° e 292,5°	69
B.11	Campos de inclinação vertical (°) para as direcções 300° e 307,5°	70
B.12	Campos de inclinação vertical (°) para as direcções 315° e 322,5°	71
B.13	Campos de intensidade turbulenta (%) para as direcções 105° e 107,5°	73
B.14	Campos de intensidade turbulenta (%) para as direcções 120° e 127,5°	74
B.15	Campos de intensidade turbulenta (%) para as direcções 135° e 142,5°	75
B.16	Campos de intensidade turbulenta (%) para as direcções 285° e 292,5°	76
B.17	Campos de intensidade turbulenta (%) para as direcções 300° e 3075°	77
B.18	Campos de intensidade turbulenta (%) para as direcções 315° e 322,5°	78
C.1	Perfis de velocidade para os aerogeradores WTG 1, WTG 2 e WTG 3	81
C.2	Perfis de velocidade para os aerogeradores WTG 4, WTG 5 e WTG 6	82
C.3	Perfis de velocidade para os aerogeradores WTG 7, WTG 8 e WTG 9	83
C.4	Perfis de velocidade para os aerogeradores WTG 10, WTG 11, WTG 12 e WTG 13	84
C.5	Perfis de inclinação vertical para os aerogeradores WTG 1, WTG 2 e WTG 3	85
C.6	Perfis de inclinação vertical para os aerogeradores WTG 4, WTG 5 e WTG 6	86
C.7	Perfis de inclinação vertical para os aerogeradores WTG 7, WTG 8 e WTG 9	87

C.8	Perfis de inclinação vertical para os aerogeradores WTG 10, WTG 11, WTG 12 e WTG 13	88
C.9	Perfis de intensidade turbulenta para os aerogeradores WTG 1, WTG 2 e WTG 3 .	90
C.10	Perfis de intensidade turbulenta para os aerogeradores WTG 4, WTG 5 e WTG 6 .	91
C.11	Perfis de intensidade turbulenta para os aerogeradores WTG 7, WTG 8 e WTG 9 .	92
C.12	Perfis de intensidade turbulenta para os aerogeradores WTG 10, WTG 11, WTG 12 e WTG 13	93
C.13	Perfis de <i>shear factor</i> para os aerogeradores WTG 1, WTG 2 e WTG 3	95
C.14	Perfis de <i>shear factor</i> para os aerogeradores WTG 4, WTG 5 e WTG 6	96
C.15	Perfis shear de factor para os aerogeradores WTG 7, WTG 8 e WTG 9	97
C.16	Perfis de <i>shear factor</i> para os aerogeradores WTG 10, WTG 11, WTG 12 e WTG 13	98
F.1	Rosas dos ventos da P042 para 30 metros de altura	118
F.2	Histograma da P042	119
F.3	Intensidade turbulenta em função da velocidade média para P042 a 30 metros de altura	119
F.4	Rosas dos ventos da P384 para 30 metros de altura	120
F.5	Rosas dos ventos da P384 para 60 metros de altura	120
F.6	Histogramas da P384	121
F.7	Intensidade turbulenta em função da velocidade média na P384	121
F.8	Rosas dos ventos da P385 para 30 metros de altura	122
F.9	Rosas dos ventos da P385 para 60 metros de altura	122
F.10	Histogramas da P385	123
F.11	Intensidade turbulenta em função da velocidade média na P385	123

Lista de Tabelas

2.1	Valores constantes do modelo de turbulência k- ε padrão, por defeito	15
2.2	Valores constantes do modelo de turbulência k- ε padrão, por defeito e modificados .	16
3.1	Características da malha	22
3.2	Dimensões do domínio usadas para o FLUENT e para o WINDSIM	28
3.3	Características da malha usadas para o FLUENT e para o WINDSIM	28
4.1	Parâmetros do escoamento atmosférico	34
4.2	Média pesada dos valores dos erros relativos de P385 para o sector Sudeste, Noroeste e global	37
4.3	Média pesada dos valores absolutos dos erros relativos de P042 e P385 para diferentes alturas	37
4.4	Média pesada dos erros relativos específicos para todas as estações para cada sector e altura	38
4.5	Média pesada dos valores absolutos dos erros para o <i>shear factor</i> por sector e globais	39
4.6	Resíduos e numero de iterações para cada direcção de escoamento	50
D.1	Valores pontuais para o aerogerador WTG 1	100
D.2	Valores pontuais para o aerogerador WTG 2	101
D.3	Valores pontuais para o aerogerador WTG 3	102
D.4	Valores pontuais para o aerogerador WTG 4	103
D.5	Valores pontuais para o aerogerador WTG 5	104
D.6	Valores pontuais para o aerogerador WTG 6	105
D.7	Valores pontuais para o aerogerador WTG 7	106
D.8	Valores pontuais para o aerogerador WTG 8	107

D.9	Valores pontuais para o aerogerador WTG 9	108
D.10	Valores pontuais para o aerogerador WTG 10	109
D.11	Valores pontuais para o aerogerador WTG 11	110
D.12	Valores pontuai para o aerogerador WTG 12	111
D.13	Valores pontuais para o aerogerador WTG 13	112
E.1	Erros relativos e tamanho das amostras para direcções Sudeste, com estação de referência assinalada a azul	114
E.2	Erros relativos e tamanho das amostras para direcções Noroeste, com estação de referência assinalada a azul	115
E.3	Erros absolutos e dimensões das amostras para cada direcção	116

Nomenclature

μ	Viscosidade
μ_t	Viscosidade turbulenta
$\overline{\phi}$	Valor médio experimental da variável genérica
$\overline{E_r}$	Média dos valores absolutos dos erros relativos
$\overline{U_r}$	Velocidade média de referência
\overline{U}	Velocidade média
$\overline{v_i'v_j'}$	Média temporal de velocidades flutuantes
ϕ_n	Valor numérico da variável genérica
ρ	Massa volúmica
ε	Taxa de dissipação da energia cinética turbulenta
B	Constante experimental
$C_\mu, C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, \sigma_k, \sigma_\varepsilon$	Coefficiente do modelo de turbulência
C_s	Constante de rugosidade (roughness constant)
E	Constante empírica
E_a	Erro absoluto do shear factor
E_r	Erro relativo
G_b	termo de geração de energia cinética turbulenta devido à flutuação
G_k	Geração da energia cinética de turbulência
IT	Intensidade turbulenta
IV	Inclinação vertical

K	Constante de von Karman
k	Energia cinética de turbulência
K_S	Roughness height
K_S^+	Numero de Reynolds baseado no diâmetro de areia equivalente e na velocidade de atrito
$peso_i$	Peso do erro relativo E_{r_i}
S_K, S_ε	termo fonte das equações da energia cinética turbulenta e da taxa de dissipação
SF	Shear factor
SF_e	Shear factor experimental
SF_n	Shear factor numérico
u^+, y^+	coordenadas de parede
u_i	Componentes da velocidade de escoamento
V_x, V_y, V_z	Velocidade na componente x, y e z
Vh	Velocidade horizontal
Vh_1, Vh_2	Velocidade horizontal no ponto 1 e 2, em que o 2 está acima de 1
Vh_{60m}, Vh_{30m}	Velocidades horizontais para 60 e 30 metros do solo
Y_M	termo que tem em conta o efeito da compressibilidade
z	Altura relativamente ao solo
z_0	Rugosidade
Z_1, Z_2	Cota correspondente às velocidades horizontais 1 e 2
z_h	altura da camada limite
z_r	Altura de referência

Capítulo 1

Introdução

Actualmente as técnicas usadas para a caracterização do regime de ventos em regiões onde eventualmente será instalado um parque eólico recorrem à medição de velocidade, desvio padrão, velocidade máxima e direcção de vento por períodos de duração mínima de um ano [1]. Estas medições são efectuadas em um ou dois pontos, o que pode não ser representativo das características do vento em toda a zona de instalação do futuro parque. Regiões montanhosas devido à sua complexidade topográfica, exigem uma resolução espacial maior, que pode não ser conseguida através de aumento do número de pontos de medição, mastros meteorológicos, situações em que as técnicas computacionais se revelam de grande importância.

É importante para a instalação de parques eólicos a previsão de locais com elevada intensidade turbulenta onde ocorre separação de escoamento, o que não está ao alcance das técnicas normalmente aplicadas. Para isso, é necessário o recurso a ferramentas de simulação computacional como o software FLUENT, com capacidade para resolver as equações que regem o movimento dos fluidos, na sua forma mais geral, e por esta via aumentar o conhecimento das características gerais do vento.

1.1 Objectivos

O presente trabalho tem como objectivo principal a simulação computacional do regime de vento numa zona montanhosa de Portugal continental.

Para além deste objectivo de interesse prático, o trabalho tinha também como objectivo o uso e a aprendizagem de Mecânica dos Fluidos Computacional, designação das técnicas numéricas disponíveis na aplicação computacional FLUENT.

1.2 Descrição breve dos capítulos

O presente documento está organizado em capítulos, num total de cinco.

O capítulo 1 que agora termina é a introdução muito breve onde é descrito a importância do conhecimento detalhado do vento, os objectivos da tese e a sua organização.

O capítulo 2 apresenta as equações de conservação do modelo matemático e identifica as técnicas numéricas usadas no FLUENT.

O capítulo 3 inclui resultados de simulações iniciais para o terreno e todo o processo de criação do domínio de integração, geração de malha e escolha de opções no software que resultaram nessas simulações. Também foram comparados resultados de campos de velocidade e de intensidade turbulenta do FLUENT com os doutro software alternativo, WINDSIM. O objectivo principal deste capítulo é mostrar as funcionalidades do software FLUENT e todo o trabalho necessário para a criação do domínio e malha, que também foram precisos para as simulações tratadas no capítulo 4,

O capítulo 4 é a modelação final, cujos resultados foram objecto de análise em termos de relação dos campos com a topografia do terreno, e os perfis e valores pontuais de características do vento tendo em vista a instalação de um parque eólico, constituído por 13 aerogeradores em locais já definidos.

A tese termina com o capítulo 5, onde se resumem as conclusões principais do presente trabalho.

Capítulo 2

Modelo computacional

Neste capítulo indicam-se as equações necessárias para a simulação computacional do vento sobre regiões montanhosas. As técnicas numéricas necessárias para a resolução destas equações são descritas de forma breve, enquanto os aspectos particulares de utilização destas técnicas, como sejam a definição do domínio de integração e as condições de fronteira se faz no âmbito do problema em estudo neste trabalho, e por isso se encontra no capítulo 3,

2.1 Equações de conservação: massa e quantidade de movimento

No estudo de escoamentos atmosférico a massa volúmica constante as grandezas físicas importantes são a massa e a quantidade de movimento. O princípio fundamental de conservação para estas duas quantidades dá origem às equações da continuidade (equação 2.1) e de conservação da quantidade de movimento (equação 2.2) as designadas equações de Navier-Stokes.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho u) = 0 \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (2.2)$$

2.2 Modelo de turbulência k- ϵ padrão

Para determinação da μ_t - viscosidade turbulenta - é necessário um conjunto de equações e definições adicionais, que constituem o designado modelo de turbulência.

O modelo k- ϵ é o modelo mais usado para cálculos em CFD e grande parte das aplicações em

engenharia. É um modelo de duas equações, baseado no conceito de viscosidade turbulenta¹.

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.3)$$

Este modelo apresenta duas equações de transporte modeladas, uma para energia cinética de turbulência (k) (equação 2.4) e outra para a dissipação da energia cinética (ε) (equação 2.5).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2.5)$$

G_k representa a produção da energia cinética de turbulência resultante da média dos gradientes de velocidades.

$$G_k = -\rho \overline{v_i' v_j'} \frac{\partial V_j}{\partial x_i} \quad (2.6)$$

Tabela 2.1: Valores constantes do modelo de turbulência k- ε padrão, por defeito

C_μ	$C_{1\varepsilon}$	C_μ	σ_k	σ_ε
0,09	1,44	0,09	1	1,3

$C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, σ_k e σ_ε são constantes em que são os designados números de Prandtl turbulentos para k e ε .

2.3 Modelo de turbulência k- ε padrão modificado

As constantes que aparecem no modelo de turbulência k- ε na secção 2.2, apesar de serem as mais comuns não são universais. No caso de um escoamento atmosférico em que a estratificação é neutra, outros valores das constantes do modelo foram propostos, de forma a produzir um nível de turbulência apropriado junto ao terreno. Os valores das constantes, que estão por defeito, adoptados pelo FLUENT e os valores modificados dessas mesmas constantes que foram impostos neste trabalho estão indicadas na tabela 2.2.

O ajuste das constantes modificadas podem ser feitas de forma a obedecer à equação 2.7, que é uma relação para uma camada limite onde lei logarítmica é válida, como está referenciado no trabalho realizado por A. R. Gravdahl (1999) [10].

¹que é idealização conhecida como hipótese de Boussinesq

Tabela 2.2: Valores constantes do modelo de turbulência k- ε padrão, por defeito e modificados

	$C_{1\varepsilon}$	$C_{2\varepsilon}$	C_μ	σ_k	σ_ε
valores por defeito	1,44	1,92	0,09	1	1,3
valores modificados	1,44	1,92	0,033	1	1,835

$$C_{1\varepsilon} = C_{2\varepsilon} - \frac{K^2}{\sqrt{C_\mu}\sigma_\varepsilon} \quad (2.7)$$

2.4 Conclusão do modelo matemático

O modelo matemático é constituído pelo total de seis equações de transporte: a equação de conservação de massa (2.1); as três equações de conservação de quantidade de movimento, uma para cada componente do sistema de coordenadas tri-dimencional (2.2), e duas equações relacionadas com o modelo de turbulência utilizado, o transporte de energia cinética de turbulência (2.4) e da sua taxa de dissipação (2.5).

2.5 Técnica dos volumes finitos

As equações diferenciais 2.1, 2.2, 2.4 e 2.5 porque não têm resolução analítica, são resolvidas com recurso a técnicas numéricas, como por exemplo, a técnica dos volumes finitos. Nesta técnica, o domínio de integração é dividido em volumes de controle (células), onde as variáveis estão localizadas no centróide ou nas faces dessas células.

Depois de discretizado o domínio de integração, o próximo passo é a resolução/integração das equações diferenciais de conservação. Com isto são criadas as equações discretizadas, que expressam os princípios de conservação, tal como a equação diferencial o faz para volumes infinitesimais, garantindo assim a conservação integral das grandezas envolvidas. Mais informação sobre este método pode ser encontrado por exemplo nas referências [5], [6] e [8].

O termo convectivo das equações de transporte é aquele cuja discretização coloca maiores dificuldades (veja por exemplo [5]), e no presente estudo essa discretização faz-se através de um esquema de discretização a que são atribuídas boas qualidades: - esquema convectivo QUICK².

2.5.1 Discretização dos termos convectivos

O FLUENT proporciona vários tipos de esquemas de discretização para modelar os termos convectivos excepto o termo viscoso, que é modelado sempre com um esquema central de segunda

²Quadratic upstream interpolation for convective kinetics

ordem. Esses esquemas são os de primeira e segunda ordem a montante (first and second order upwind), a lei de potência, MUSCL e o QUICK, que é uma média pesada dos esquemas central de segunda ordem e o de segunda ordem a montante, como pode ser visto com mais detalhe em [6] e [8]. Os esquemas de ordem superior aos de primeira ordem são mais precisos o que levou à escolha de esquemas como segunda ordem para a pressão e QUICK para os restantes termos convectivos. O esquema QUICK apresenta melhores resultados para escoamentos atmosféricos em malhas estruturadas do que os de segunda ordem a montante como pode ser visto na referência [11], o que levou a preferir o esquema QUICK.

Capítulo 3

Cálculos preliminares

Um objectivo do presente capítulo é descrever a fase de aprendizagem do software FLUENT na aplicação em escoamentos atmosféricos e todo processo que foi necessário para a geração de uma malha, assim como as opções que foram feitas na utilização do software para a simulação. O que permitiu depois numa fase mais avançada comparar resultados de simulações.

3.1 Introdução

A resolução de um problema de CFD, pode ser dividida em três partes principais:

1. O pré-processamento, que consiste em definir a geometria do problema, definir a região do terreno do espaço, domínio de integração, onde as equações são válidas, que pode estar constituídos pelos seguintes passos:
 - (a) Criação do volume, que representa a espaço em que o ar flui sobre o terreno em estudo.
 - (b) Divisão do domínio numérico em volumes de controlo – construção da malha. Esta construção foi feita com o software Gambit.
 - (c) Condições de fronteira apropriadas nas células que tocam as fronteiras do domínio. No presente trabalho, assumem especial relevância a fronteira de entrada, onde será imposto um perfil de velocidades e a fronteira-chão onde será necessário impor rugosidade. A definição e caracterização destas condições foram tratadas na secção 3.3.1.2.
 - (d) Definição dos fenómenos físicos que têm que ser modelados, incluído as características do fluido. Neste caso é importante a modelação da turbulência que passa sempre por utilizar um modelo de turbulência (que está caracterizado na secção 2.2) e da velocidade.
2. Processamento de problemas de CFD passa pela resolução das equações que constituem o modelo matemático, equações da continuidade, quantidade de movimento (Navier-Stokes) e

modelo de turbulência.

3. Pós processamento, que consiste em representar a solução do problema de uma forma gráfica. Para este capítulo foi gerado campos de velocidade e de intensidade turbulenta que caracteriza o escoamento numa determinada área de um terreno.

3.2 Descrição da topografia

A zona do mapa que se estende desde o canto Sudoeste até ao canto Nordeste é a mais montanhosa, localiza-se entre duas regiões que têm cerca de 500 metros de altura, é uma cordilheira irregular com vales associados que constitui uma faixa cuja altura média vai aumentando progressivamente desde Sudoeste até Nordeste. A Nordeste encontra-se a zona de maior altitude com cerca de 2000 metros. A cordilheira apresenta uma variação de altitude, 500 metros até aos 1990 metros, que indicia a existência de elevados declives, com influência no regime de ventos, manifestada por maior turbulência e velocidade que noutras zonas do mapa. Nesta parte do terreno está prevista a construção do parque eólico, sobre o qual incidiram o estudo computacional do presente trabalho.

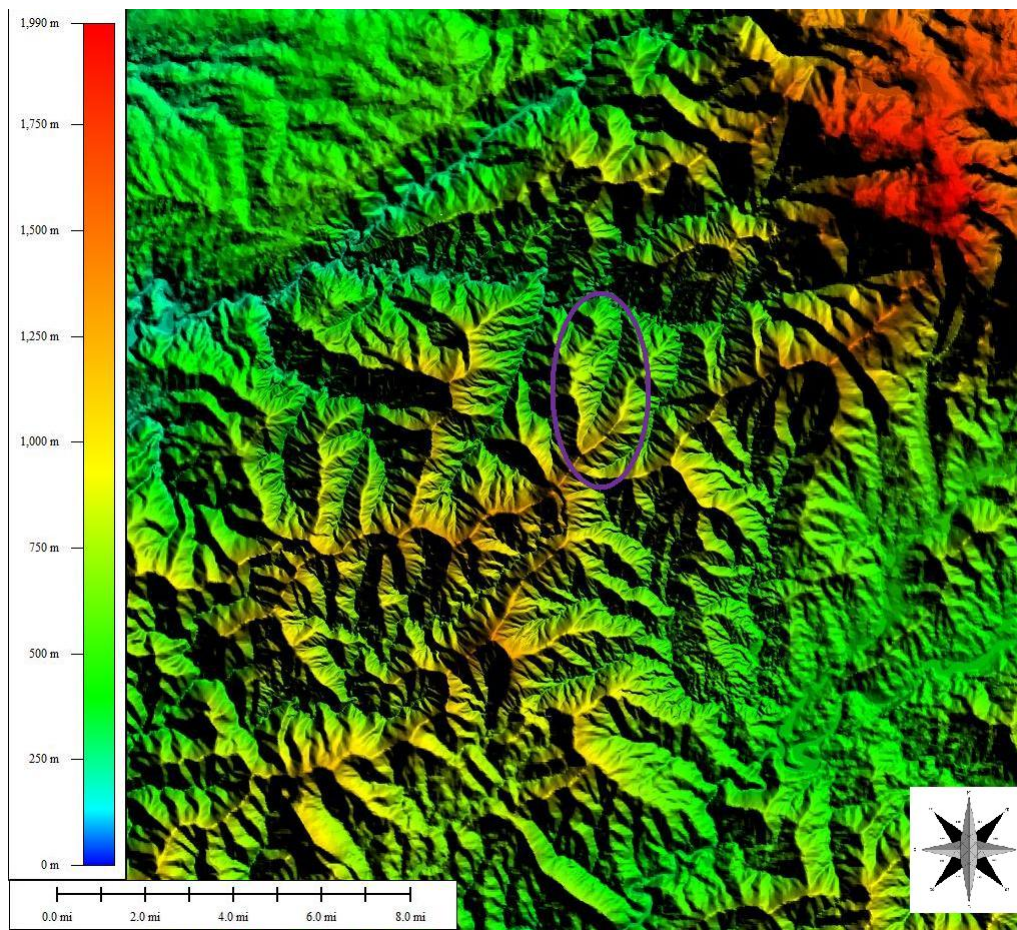


Figura 3.1: Topografia do terreno

Descrição topográfica na zona do parque eólico: É importante fazer uma descrição mais específica da topografia do terreno, ou seja, uma descrição da topografia na zona de interesse (parque eólico). É possível comparar as cristas de vertentes abruptas onde estão localizados os aerogeradores, (figura 3.2) a uma forma muito peculiar que se assemelha a um “V” orientado para norte. Em redor desse “V” existem vales associados onde são propícios à formação de zonas de recirculação do escoamento e assim provocar elevada turbulência.

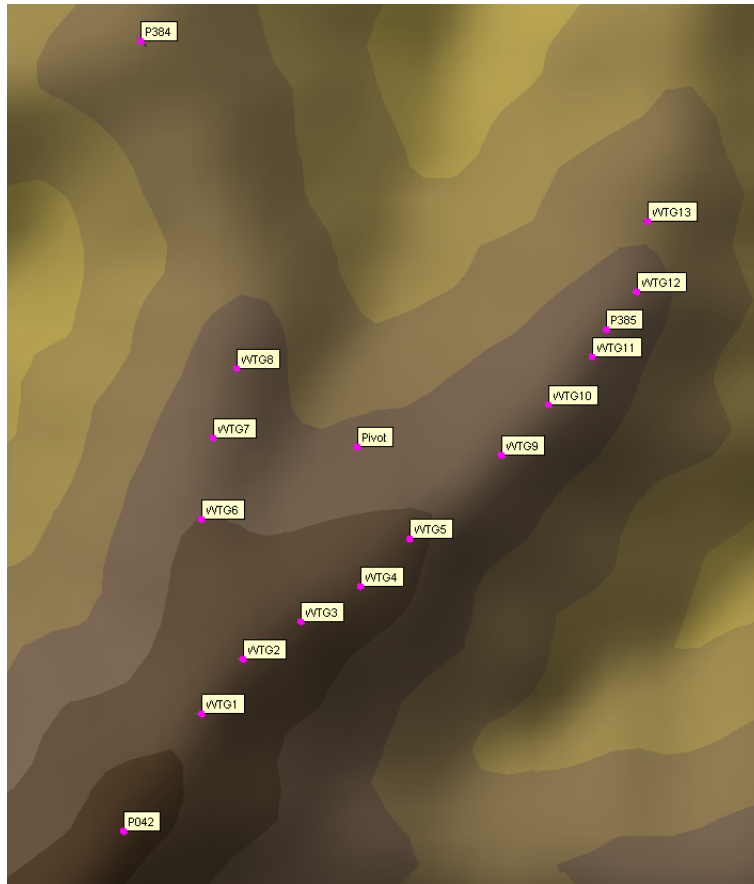


Figura 3.2: Apresentação espacial dos aerogeradores

3.3 Simulação para a direcção norte-sul

Numa primeira fase de utilização do software, foi estudado o escoamento atmosférico na direcção norte-sul com o objectivo de caracterizar o escoamento na zona de interesse assinalada na figura 3.1. Esta área que foi analisada tem uma dimensão de 20 x 20 km e encontra-se no centro do terreno. Esta área coincide com a zona onde um parque eólico vai ser implementado que constitui a zona de interesse.

3.3.1 Pré-Processamento

Delimitação do terreno, criação do domínio de integração e geração da malha: Inicialmente foi feito um estudo de um excerto do terreno em formato map. Para obter este excerto editou-se o terreno no wasp map editor, utilizando uma funcionalidade deste software que permitia delimitar a área a estudar. Depois de definida a área do terreno foi feita uma exportação do terreno para o formato xyz, com informação das coordenadas cartesianas dos pontos que definem o terreno.

Foi possível com o software Terraincad fazer a importação desses pontos para depois criar um terreno por um método de triangularização. Este terreno foi exportado com a extensão stl, visto o Gambit ter a capacidade de fazer a importação de ficheiros “mesh” em stl, mesh porque o método de triangularização de criação de terrenos em softwares, como o Terraincad, faz uma malha triangular não-estruturada que forma o terreno.

Limpeza da superfície importada: Numa primeira fase de criação do volume, onde é gerada uma malha, é necessário a correcção de algumas geometrias que podem provocar erros na posterior geração da malha, para isso recorreu-se ao comando Geometry - Clean up do Gambit. Com este comando foi possível a eliminação das faces pequenas, para isso foi usado o método merge (que não é mais do que a fusão das faces), de “hard edges” (são linhas que definem uma face mas que estão “dentro” da mesma), e de linhas pequenas.

Criação do volume: Depois da limpeza, foi necessário criar um plano no GAMBIT que definisse a altura do volume a ser criado, para depois projectar as linhas, que delimitam a superfície do terreno, nesse plano. Estas linhas projectadas foram necessárias para formar uma face que definisse o topo do volume ou do domínio. Com os cantos da superfície do terreno e da face formada foram geradas linhas para formar as faces norte, sul, oeste e este. Com estas faces que constituem as fronteiras do volume em análise, criou-se esse mesmo volume a partir do comando Form Volume do Gambit.

O domínio criado tem uma base quadrada, com 20000 metros de lado, e altura de 5800 metros.

Geração da malha: Com o volume formado procedeu-se à geração da malha figura 3.3 estruturada e mais concentrada junto ao terreno.

A malha tem as características apresentadas na tabela 3.1.

Tabela 3.1: Características da malha

Δx	1000 m
Δy	1000 m
Rácio entre o primeiro elemento e o ultimo em z	0,1
numero de elementos em z	10

Δx e Δy representam os comprimentos dos elementos (células) da malha para a coordenada x e y.

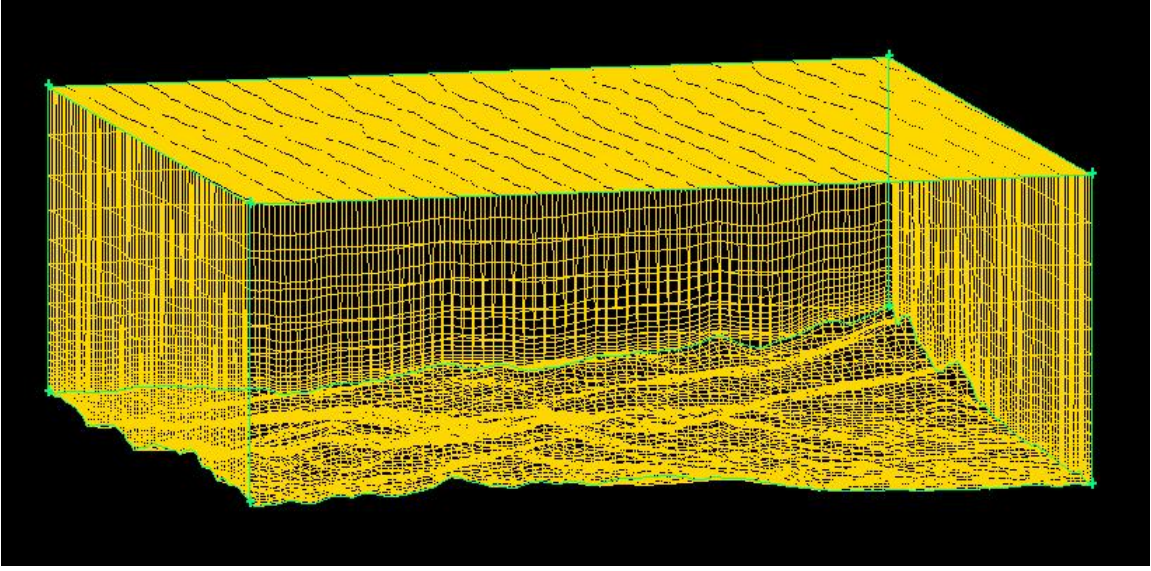


Figura 3.3: Malha gerada no gambit

3.3.1.1 Funções de parede para superfícies rugosas

A solução final de uma simulação de CFD depende das condições de fronteira, do modelo de turbulência e da influência da rugosidade do solo, para traduzir essa influência é necessário o recurso a funções de parede. A camada limite turbulenta junto a paredes pode ser caracterizada em função da rugosidade adimensional K_S^+ , [7].

$$K_S^+ = \frac{\rho K_S u_t}{\mu} \quad (3.1)$$

A lei logarítmica modificada para paredes rugosas (ep:3.2) [7].

$$u^+ = \frac{1}{K} \ln(y^+) + B - \Delta B \quad (3.2)$$

Onde $u^+ = \frac{u}{u_t}$ e $y^+ = \frac{\rho y u_t}{\mu}$ são as coordenadas de parede, K é a constante de von Karman e B é uma constante experimental com valor de 5,45, O termo ΔB pode ser expresso em função da rugosidade adimensional K_S^+ . No software FLUENT 6.3 a expressão para ΔB para escoamentos totalmente rugosos ($K_S^+ \geq 0.9$), que normalmente corresponde à condição de escoamentos atmosféricos, é a

seguinte: $\Delta B = \frac{1}{K} \ln(1 + C_S K_S^+)$

Apesar da semelhança de nomenclatura, o valor de K_S (roughness height) não é igual ao de z_0 (roughness length). Estes valores estão relacionados pela seguinte expressão:

$$K_S = z_0 \frac{E}{C_s} \quad (3.3)$$

A constante E é uma constante empírica que toma o valor 9,793 no FLUENT para a lei de parede com rugosidade. Usando o valor de C_s de 0,5 (valor base no FLUENT), obtém-se aproximadamente:

$$K_S = 20 \cdot z_0 \quad (3.4)$$

Sendo $z_0 = 0.03$ o parâmetro K_S vai ser igual 0,6.

De acordo com as sugestões do manual do FLUENT [2] o uso apropriado das funções de parede para superfícies rugosas, exige que o centro das células adjacentes esteja a uma distância do solo superior à rugosidade K_S . No entanto se for necessário uma malha mais refinada junto à parede é aconselhável que a constante C_S seja aumentada de maneira a que o produto $K_S C_S$ se mantenha invariável.

Sob o ponto de vista teórico as funções de parede só são correctas se o gradiente de pressões horizontal for desprezável (em condições de equilíbrio), mas normalmente no uso de software comerciais, as funções de parede são aplicadas mesmo quando esse gradiente não são desprezáveis o que não provoca grande alteração na solução final.

3.3.1.2 Perfil de velocidades

No geral a velocidade média do vento aumenta com a distância ao solo, isto é existe um gradiente de velocidades em função da altura ao solo. Isto deve-se ao efeito de atrito, por obstáculos existentes no solo, como árvores, montanhas, etc. Todos estes elementos que induzem um gradiente de velocidades no vento, são encarados como rugosidade dinâmica. Dado que a influência desta rugosidade sobre vento diminuir com altura, é lógico falar numa altura aproximada a partir da qual esta perturbação deixa de ser significativa, sendo essa altura de 300 a 500 metros. A zona do escoamento atmosférico que sofre grande influência da rugosidade é conhecida por camada limite. Acima desta zona, como a velocidade não varia muito, o perfil de velocidades pode ser encarado como uniforme. Já no que respeita à camada limite, e utilizando os conceitos anteriores, a sua altura está dependente da rugosidade aerodinâmica do solo. Por outro lado, se o perfil de velocidades for traduzido por uma função $U(z)$ (função da distância à superfície z), é necessário que essa função seja também função da rugosidade aerodinâmica do terreno em causa. Esta função pode ser do tipo potência ou logarítmico, mas a que é usada neste estudo é a logarítmica (eq:3.6). A descrição matemática do perfil de velocidades é essencial para a definição da acção do vento

sobre terrenos montanhosos, na medida em que ao impor uma condição de entrada de escoamento atmosférico no terreno, é necessário ter em conta que esse escoamento antes de entrar no domínio em estudo já sofreu perturbações do terreno. O perfil logarítmico é precisamente um perfil de velocidades que sofreu com a influência de rugosidade, logo é imposto este tipo de perfil como condição de entrada no domínio em estudo.

$$\frac{U(z)}{u_t} = \frac{1}{K} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \quad (3.5)$$

$$\frac{\overline{U}(z)}{\overline{U}_r(z_r)} = \frac{\ln \left(\frac{z}{z_0} \right)}{\ln \left(\frac{z_r}{z_0} \right)} \quad (3.6)$$

3.3.1.3 Condições de fronteira

O terreno é considerado como parede rugosa, o que fornece algumas dificuldades na modelação, que estão relacionadas com a rugosidade do terreno, e obriga à utilização de funções de parede como foi visto na subsecção 3.3.1.1.

Quanto às outras fronteiras, o topo é tratado como um plano de simetria, a fronteira por onde entra o vento é condição de entrada de velocidade (velocity_inlet), onde o perfil de velocidades, é definido. Foi aplicando a equação (3.6), para uma velocidade máxima de 7 m/s, altura de camada limite de 300 metros e rugosidade igual 0,03. A fronteira que constitui a saída do escoamento atmosférico é imposta uma condição de saída (outflow), enquanto nas fronteiras laterais são impostas condições de simetria.

Definição do perfil de velocidades para a condição de entrada

Foi possível definir um perfil de velocidades, que depois é implementado no FLUENT, através do UDF¹ seguinte (informação sobre UDF em [2]):

```
#include "udf.h"

DEFINE_PROFILE(log_velocity,thread,index)
{
    real x[ND_ND];
    real z;
    face_t f;
```

¹User define function

```

begin_f_loop(f,thread)
{
F_CENTROID(x,f,thread);
z = x[2];
F_PROFILE(f,thread,index) = -7*log(z/0,03)/log((490+500)/0,03);
}
end_f_loop(f,thread)
}

```

Esta metodologia para definir um perfil de velocidades como condição de entrada no domínio, é bocado limitadora, na medida em que o perfil de velocidades definido foi determinado com uma incógnita z em coordenadas absolutas (isto é em relação a um referencial global) e não relação ao terreno. Outra limitação foi o facto de com a determinação da solução com um processamento em paralelo não se obter resultados credíveis de velocidade de escoamento e de turbulência, na medida em que a solução segregada não corresponder à solução obtida quando não se faz uso do processamento em paralelo. Para que os resultados fossem razoáveis seria necessário fazer modificações no udf que tornaria o problema demasiado complexo, tanto para definir z como a altura em relação ao solo assim como para possibilitar o processamento em paralelo com a utilização de udf.

Por todos os motivos anteriormente apresentados recorreu-se a uma alternativa para definir o perfil de velocidades como condição de fronteira de entrada do domínio em análise. Esta alternativa consistia em criar um ficheiro de perfil de velocidades (profile file) a partir do qual se definiria a velocidade em vários pontos da face que constituía a fronteira pela qual o escoamento entrava. Para isso foi criada uma função em Matlab que permitia definir o perfil de velocidades logarítmico em função da distância ao solo, para mais informações [4].

3.3.2 Pós-processamento

Nesta secção apresentam-se os resultados da simulação computacional para a zona do terreno que está descrito na secção 3.2.

O critério de convergência foi a exigência de que os resíduos de todas equações fossem inferior a 1×10^{-4} , foi estabelecido de acordo com o observado na figura 3.4, que mostra que este critério corresponde à resolução das equações no limite de precisão do computador utilizado.

Em relação ao campo de velocidades e de turbulência o FLUENT não apresenta grande variação de velocidade de escoamento ao longo do terreno para uma altura de 80 metros do solo, uma vez que a resolução da malha não é suficiente para permitir uma determinação de um elevado gradiente de

velocidades, como se pode verificar na figura 3.5.

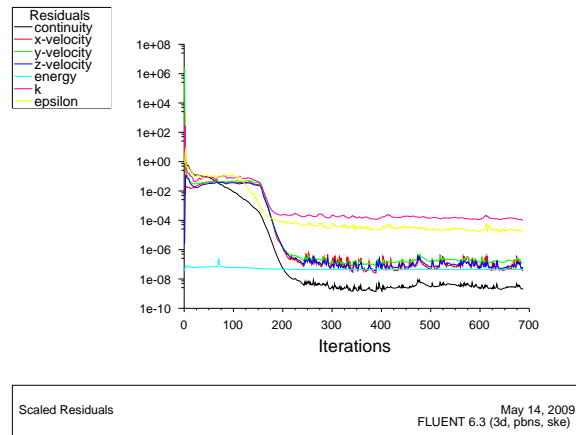


Figura 3.4: Representação gráfica dos resíduos

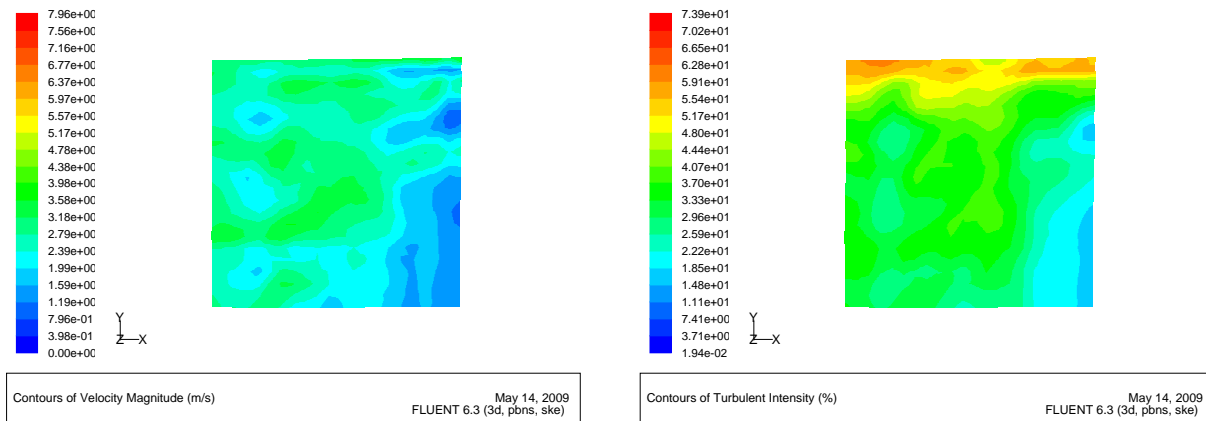


Figura 3.5: Campo de velocidades e de intensidade turbulenta para a malha de 20x20x10

Resultados para malhas mais refinadas

Para resultados mais precisos foi gerada uma malha com uma resolução quatro vezes superior, com $40 \times 40 \times 10$. No entanto mesmo com esta resolução, os resultados de campo de velocidades de intensidade de turbulência apresentavam pouca variação em relação à malha inicial. Com isto, foi necessário criar uma malha ainda mais refinada, com $80 \times 80 \times 20$ elementos (figura 3.3), e uma resolução 8 vezes superior à malha inicial. Esta malha já permitiu determinar uma gama de velocidades e de intensidade de turbulência mais alargada, como mostra a figura 3.6.

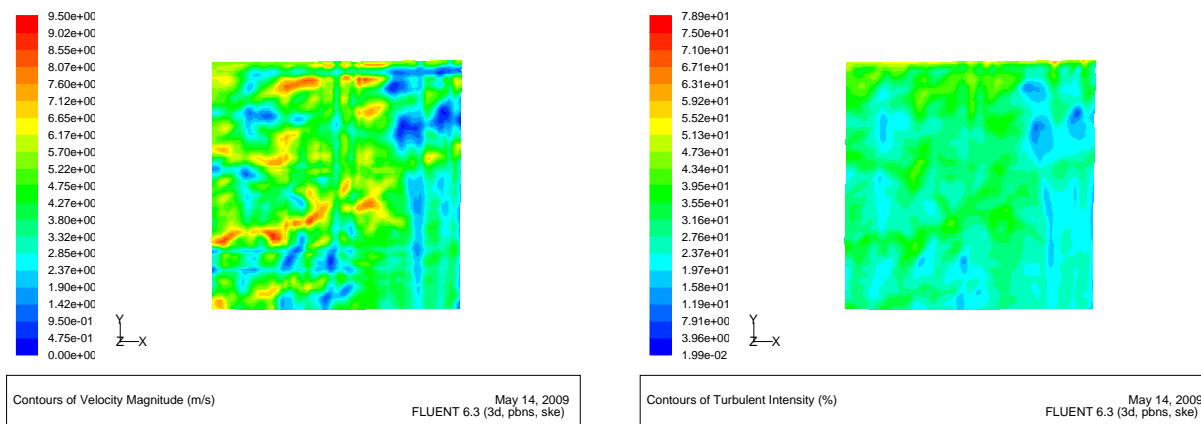


Figura 3.6: Campo de velocidades e de intensidade turbulenta para a malha 80x80x20

3.4 Simulação do escoamento atmosférico para outras direcções

Como o escoamento foi simulado só para uma direcção (norte-sul), era necessário simular o escoamento atmosférico para outras direcções.

No que respeita à área que foi utilizada, desta vez foi menor e não se encontrava centrada no terreno que foi fornecido. Isto porque a zona do terreno onde está localizado o parque eólico não se situava exactamente no centro do terreno, como mostra a figura 3.1. Por isso foi necessário definir as coordenadas de um ponto em que se localizava numa zona específica do parque eólico que serviria como pivot para definir os limites do novo excerto do terreno.

3.4.1 Pré-processamento

Condições de escoamento atmosférico impostas: Os escoamentos atmosféricos foram simulados para quatro direcções: 112,5, 135, 192,5, 315 graus contados a partir da direcção norte no sentido horário. Quanto ao perfil de velocidades imposto para este problema foi igual ao da simulação inicial, secção 3.3.

Dimensões do domínio de integração: Os limites do excerto foram definidos para que a extensão de terreno que se encontra entre o pivot e a fronteira de entrada, onde foi imposta a condição de entrada de escoamento, fosse maior que a extensão de terreno entre o pivot e o fronteira de saída, onde foi definida a condição de saída de escoamento. Isto porque, o escoamento atmosférico que chega ao parque eólico, ou seja o que vem da fronteira de entrada, está sob a

influência do terreno que se situa a montante, por isso quanto maior o terreno que se encontra a montante do parque eólico na direcção do vento, mais realista será a caracterização do escoamento na zona do parque.

No que respeita ao terreno que está a jusante do parque não precisa de ser muito extenso, visto que o vento que passa nessa zona do terreno já não tem muita influência na caracterização do escoamento no parque. Tendo isto em consideração foi definido uma extensão de 10 km de terreno a montante do pivot e 6 km a jusante, com 10 km de lado.

Como as zonas do terreno que estão a montante e a jusante do pivot são definidas em função da direcção do vento, é necessário rodar os limites do excerto do terreno impostos para que as extensões anteriormente definidas para montante e jusante sejam sempre as mesmas para qualquer direcção de vento. Para proceder à rotação e ao “corte” do terreno de forma a obter o excerto de terreno desejado para as quatro direcções e com as dimensões já mencionadas, foi criado uma função no software Matlab que se encontra no apêndice A.

Domínio e malha usados pelos softwares FLUENT e WINDSIM: Para este exercício as dimensões do domínio computacional e as características da malha usadas nos dois softwares são as seguintes:

Tabela 3.2: Dimensões do domínio usadas para o FLUENT e para o WINDSIM

Distancia a montante do pivot	10000 m
Distancia a jusante do pivot	6000 m
Largura	10000 m
Altitude	6000 m

Tabela 3.3: Características da malha usadas para o FLUENT e para o WINDSIM

Δx	651,05 m
Δy	651,05 m
Rácio entre o primeiro elemento e o ultimo em z	0,1
numero de elementos em z	10

3.4.2 Pós-processamento

Como se pode ver os resultados do campo de velocidades são semelhantes, as zonas de maior e de menor velocidade são quase as mesmas apesar da variação de velocidades em certas zonas serem detectadas pelo WINDSIM e não pelo FLUENT, já no que toca à intensidade de turbulência não se verifica similaridade.

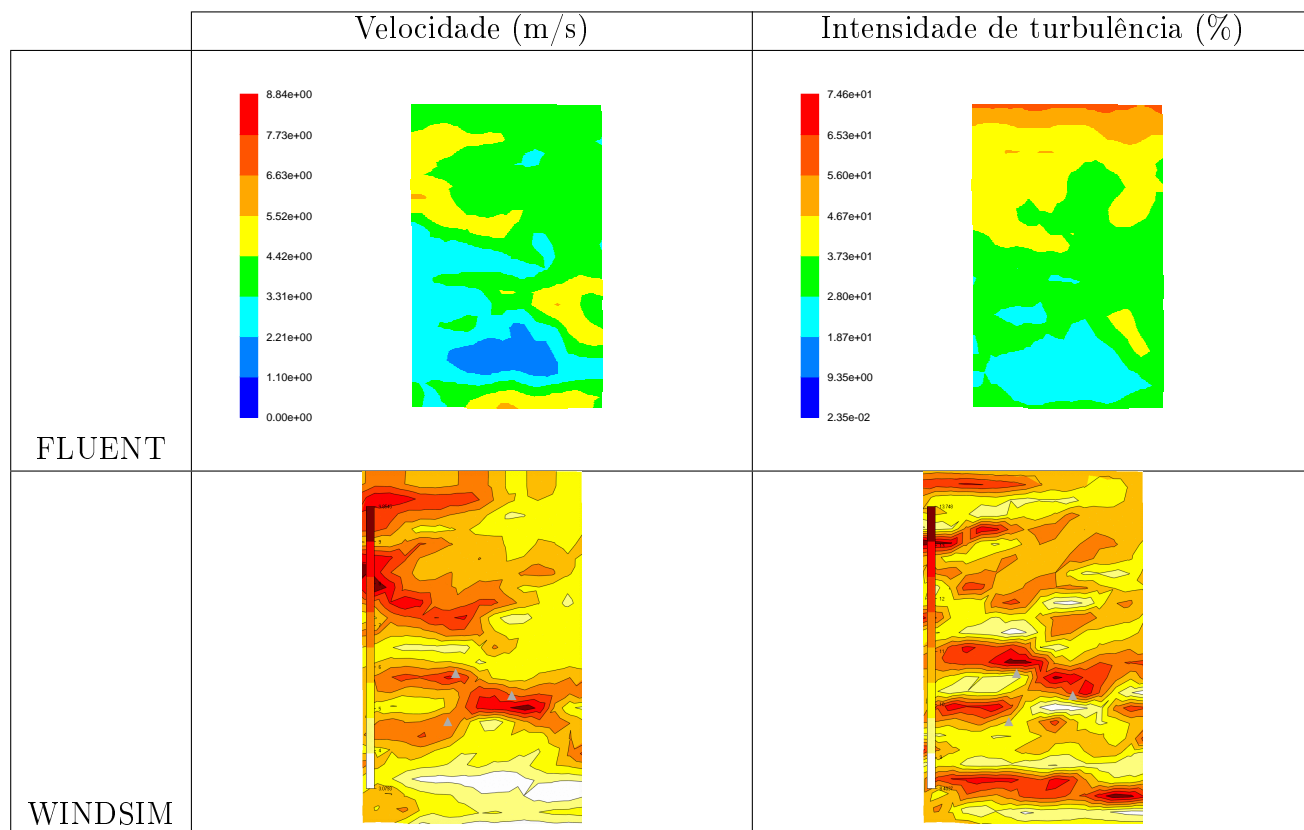


Figura 3.7: Campos de velocidade e de intensidade turbulenta para a direcção 112,5°

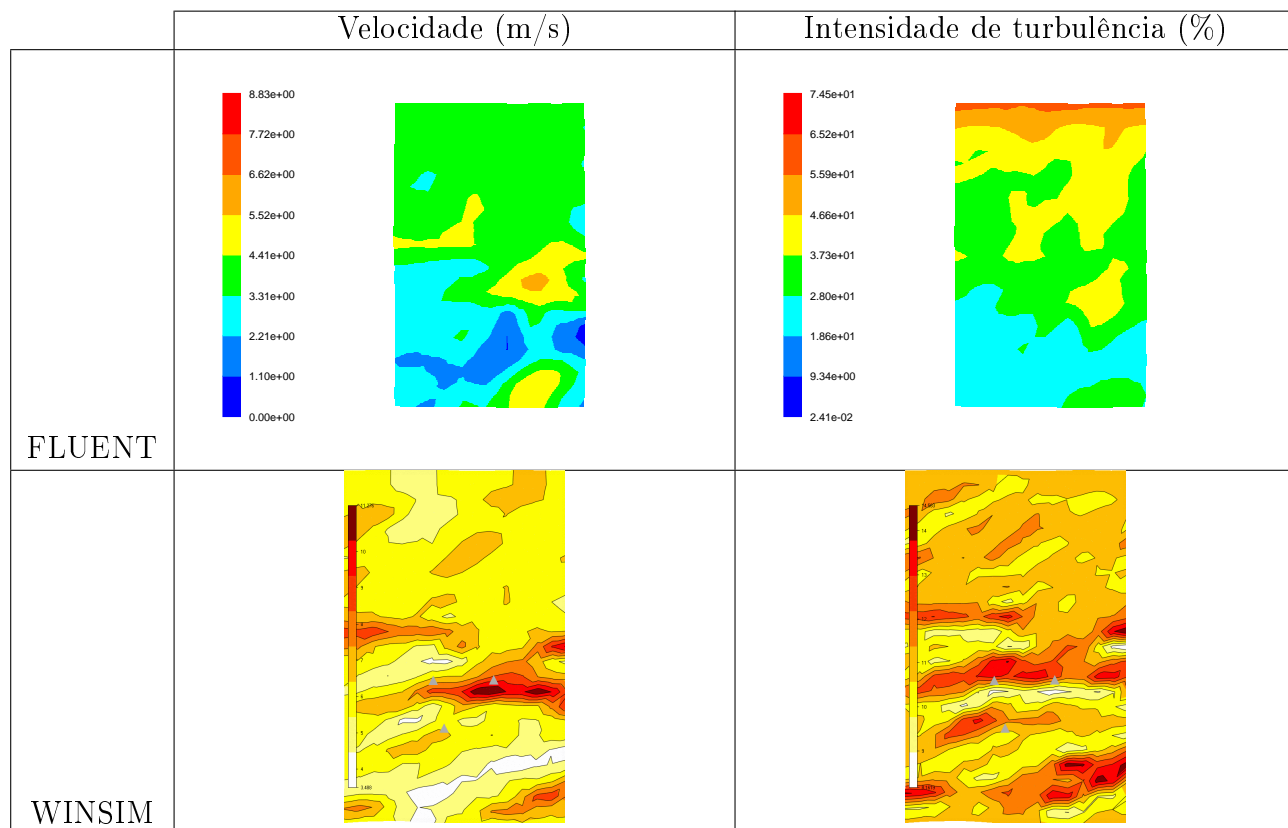


Figura 3.8: Campos de velocidade e de intensidade turbulenta para a direcção 135°

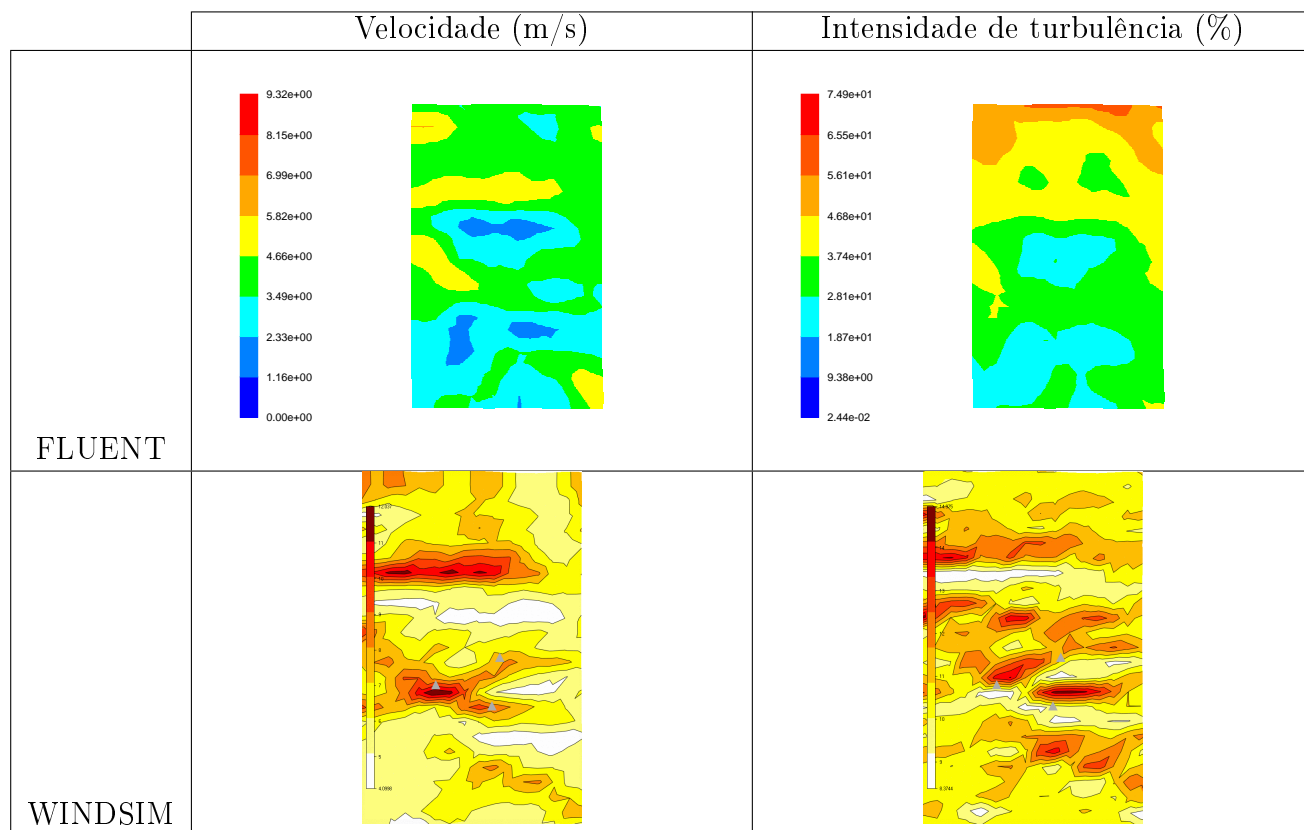


Figura 3.9: Campos de velocidade e de intensidade turbulenta para a direcção 292,5°

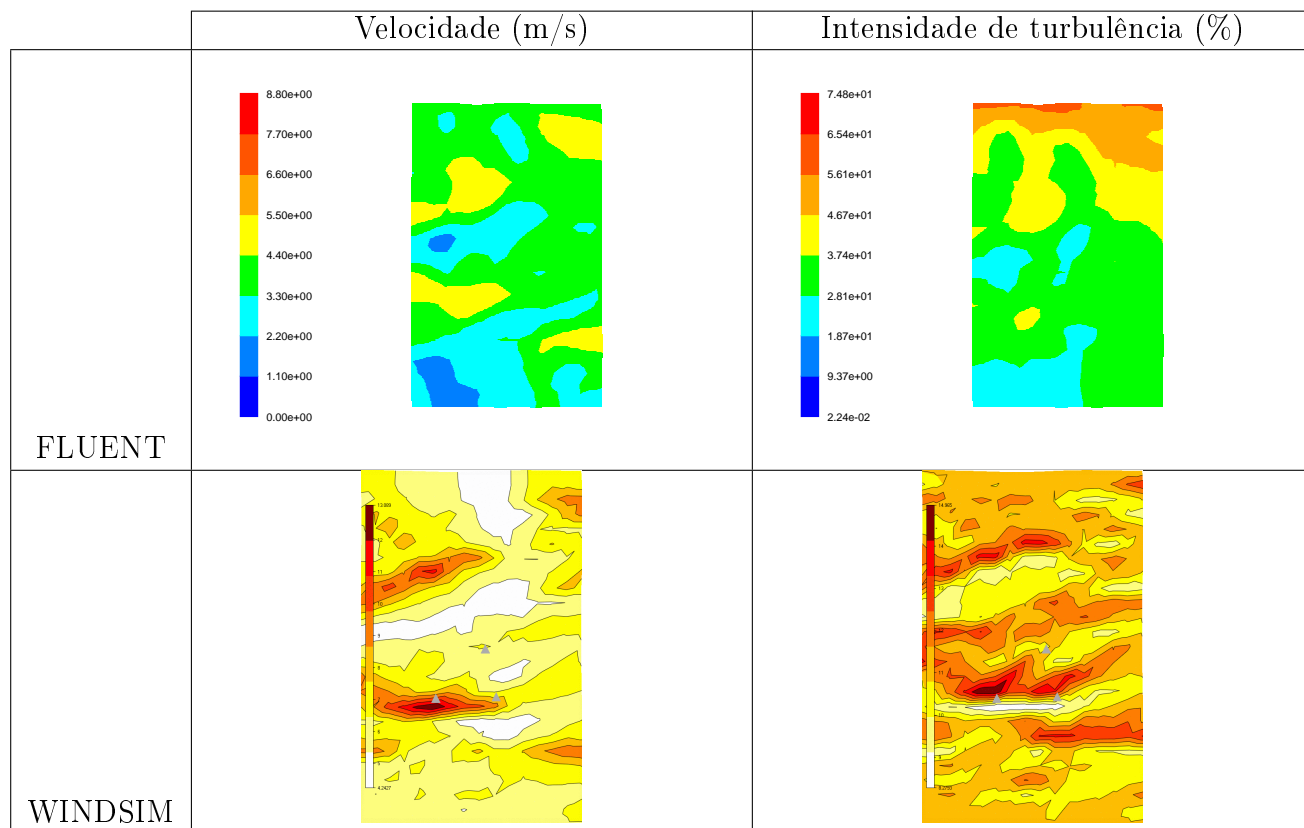


Figura 3.10: Campos de velocidade e de intensidade turbulenta para a direcção 315°

3.5 Conclusões

1. Esta primeira fase de aplicação do software foi importante para conhecer a melhor forma de gerar o domínio computacional e a malha. Também foi essencial no que respeita à escolha das opções existentes no FLUENT que melhor se enquadravam na simulação de escoamentos atmosféricos, como é exemplo disso a escolha do esquema convectivo.
2. Com esta primeira abordagem à simulação sobre o terreno foi perceptível a influência do refinamento da malha nos resultados finais nos campos de velocidade e de turbulência.
3. O numero de iterações e o tempo de computação necessário para se obter a convergência para o mesmo resíduo é maior no FLUENT do que no WINDSIM.
4. Os campos de velocidades resultantes dos softwares comparados foram similares em termos de zonas onde ocorria maior ou menor velocidade de escoamento.
5. Os campos de turbulência resultantes não tinham a mesma correspondência que se verificava para os campos de velocidades entre os dois softwares.

Capítulo 4

Modelação final

Neste capítulo analisam-se os campos de velocidade, de intensidade turbulenta e de inclinação vertical, em função da topografia na zona do terreno onde está prevista a construção do parque eólico. Perfis e valores pontuais a diferentes alturas, da velocidade, inclinação vertical, intensidade turbulenta e o *shear factor* que são analisados nos locais de instalação dos aerogeradores. Os resultados numéricos são comparados com dados medidos nas estações, para efeitos de validação.

4.1 Descrição do problema

As simulações de escoamento atmosférico inclui as direcções do vento 105° , 120° , $127,5^\circ$, 135° , $142,5^\circ$, 285° , $292,5^\circ$, 300° , $307,5^\circ$, 315° e $322,5^\circ$. Tal como anteriormente, foram criados domínios para as direcções de vento de modo a que a distância da fronteira de condição de entrada, a montante, e a distância da fronteira com condição de saída, a jusante, do pivot fosse a mesma para todas as direcções de vento, na secção 3.4.1.

As rosas-dos-ventos que estão no apêndice F mostram que as direcções mais frequentes são as dos sectores Noroeste e Sudeste, as velocidades médias mais altas também se localizam nesses sectores, no geral. Como combinação final das rosas de frequências e de velocidades, tem a rosa-dos-ventos de energia que permite observar como análise final, as direcções do vento mais vantajosas em termos de aproveitamento energético. Essas direcções são as do sector Noroeste e Sudeste, como pode ser vista como exemplo nas rosas-dos-ventos da estação P042 na figura 4.1. O que justifica o porquê das direcções simuladas.

As rosas-dos-ventos que estão no apêndice F, foram criadas a partir de dados de vento com períodos de medição que vão desde 1 de Setembro de 1997 até 1 de Setembro de 2008 para a estação P042, e de 1 de Setembro de 2007 até 1 de Setembro de 2008 para as estações P385 e P384.

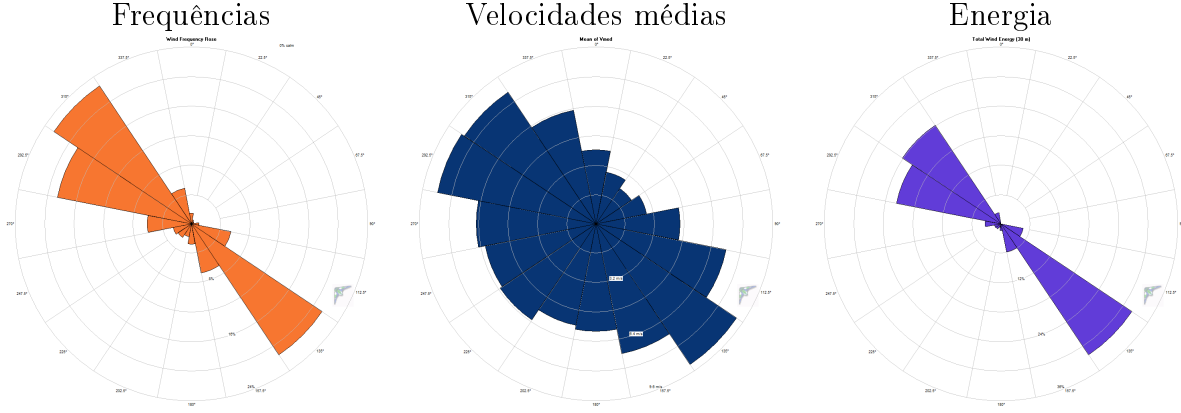


Figura 4.1: Rosas dos ventos da P042 para 30 metros de altura

Domínio e malha usadas: O domínio criado para modelar o escoamento atmosférico na área do parque eólico tem uma base de 16000 por 10000 metros com 5000 metros de altura. O pivot localiza-se a 10000 metros da fronteira de entrada de vento, a 6000 da saída.

Quanto à malha gerada para os domínios tem o elemento mais pequeno no pivot, com uma base de 30 metros de lado e altura de 2, A malha tem 85 elementos na direcção transversal, 130 na longitudinal e 50 na vertical o que é igual a ter 552500 elementos no total. Como o elemento mais pequeno está localizado no pivot, logo a malha é mais concentrada no pivot na direcção longitudinal e transversal e mais concentrada junto ao terreno na direcção vertical.

4.2 Condições de fronteira

As condições de fronteiras foram as mesmas usada em 3.3.1.3, excepto que para a condição de entrada do domínio foram definidas para além de um perfil de velocidades, um perfil de energia cinética de turbulência (TKE) e de taxa de dissipação de turbulência (TDR).

4.2.1 Condições de entrada

O perfil vertical de velocidade e de turbulência imposto na condição de entrada corresponde a uma camada limite totalmente desenvolvida para uma dada rugosidade, a mesma rugosidade imposta no terreno. A expressão analítica dos perfis de velocidade é a lei logarítmica que foi discutida em 3.3.1.2, TKE e TDR são as seguintes:

$$velocidade : \begin{cases} U(z) = \frac{u_*}{K} \ln \left(\frac{z+z_0}{z_0} \right) & z < z_h \\ U(z_h) & z \geq z_h \end{cases} \quad (4.1)$$

$$TKE : \begin{cases} k(z) = \frac{u_*^2}{\sqrt{C_\mu}} \left(1 - \frac{z}{z_h}\right)^2 & z < z_h \\ 0.0001 & z \geq z_h \end{cases} \quad (4.2)$$

$$TDR : \varepsilon(z) = \frac{u_*^3}{K \cdot z} \quad (4.3)$$

em que os perfis de TKE (4.2) e TDR (4.3) correspondem às condições de turbulência de entrada do domínio computacional usadas no software FLUENT. Estes perfis correspondem aos usados por Xiaodong Zhang (2009) [11], na simulação de escoamentos atmosféricos com o software FLUENT, com bons resultados. Como pode ser visto no trabalho realizado por Jerome Leroy (1999) [9] usando o código de volumes finitos CFD, Phoenix, por Gravdahl (1999) [10], foram usados perfis muito similares que também permitiu a obtenção de resultados satisfatórios.

Estes perfis de velocidade, de TKE e de TDR podem ser obtidos por simulação de um escoamento sobre uma placa plana. Como estes perfis são totalmente desenvolvidos é necessária uma placa com uma extensão muito grande. Para evitar um domínio computacional muito extenso pode-se recorrer à simulação com condições periódicas, em que o valor das variáveis à saída do domínio é depois usado como condições de entrada do mesmo domínio para uma simulação posterior.

4.2.2 Parâmetros do escoamento atmosférico

Para esta parte do trabalho o valor de velocidade na zona de escoamento livre é de 7,65 m/s e altura de camada limite é de 1500 metros, a velocidade de fricção u_* foi obtida de forma a que $U(1500) = 7.65 \text{ m/s}$.

Tabela 4.1: Parâmetros do escoamento atmosférico

Parâmetro	$u_* \text{ [m/s]}$	$z_0 \text{ [m]}$	$z_h \text{ [m]}$	$\rho \text{ [kg/m}^3\text{]}$	$\mu \text{ [kg/(m \cdot s)]}$
Valores	0.28	0.03	1500	1.225	1.7894×10^{-5}

O z_0 é um valor indicativo da rugosidade que reina no terreno, no entanto a rugosidade imposta no terreno foi uma rugosidade variável em função de x e y que foi fornecida num ficheiro xyr.

Com as equações (2.3), (4.2) e (4.3) construi-se o gráfico da figura 4.2, no Matlab, de viscosidade turbulenta em função da altura ao solo, utilizando os parâmetros da tabela 4.1:

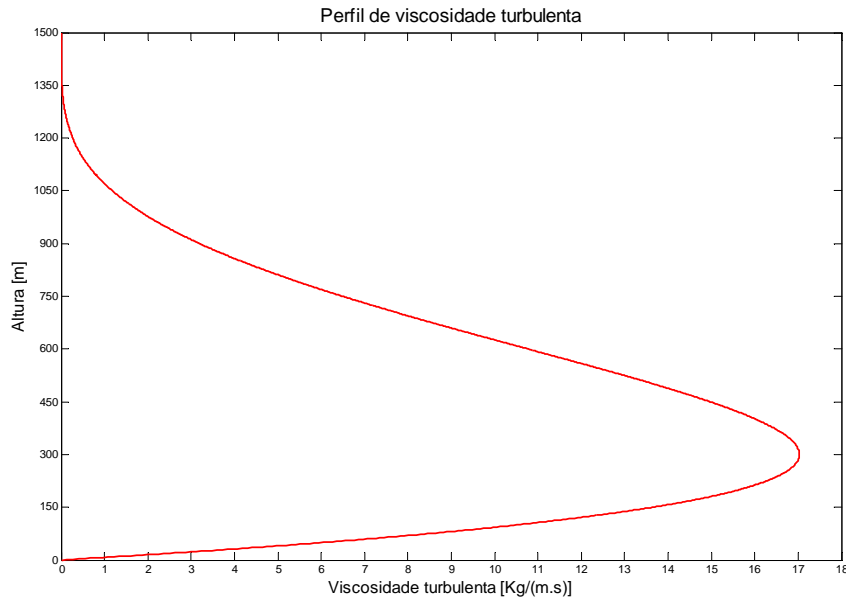


Figura 4.2: Viscosidade turbulenta em função da altura

verificou-se que a viscosidade turbulenta atinge o máximo valor a 300 metros de altura do solo, ou seja a um quinto da altura da camada limite, tal como em Xiaodong Zhang (2009) [11]. Sendo a viscosidade turbulenta máxima igual a $17.0286 \text{ kg}/(\text{m.s})$. Logo o rácio de viscosidade turbulenta pode ser determinado como se segue: $\frac{\mu_{t,max}}{\mu_t} = 9.5164 \times 10^5$. Este valor é superior ao que normalmente se verifica em aplicações industriais. O FLUENT por defeito tem estabelecido um limite no rácio de viscosidade turbulenta que é de 1×10^5 , logo é necessário modificar este limite para um valor muito mais elevado, na ordem dos 2×10^7 ou mais, como é sugerido por Xiaodong Zhang (2009) [11].

4.3 Validação do modelo

4.3.1 Filtragem de dados experimentais

Para comparar os resultados numéricos de velocidade, de direcção de vento, de intensidade turbulenta e *shear factor* com os dados experimentais, foram obtidos valores numéricos do local da estação P384 dessas grandezas. Depois, foram seleccionados os dados experimentais da mesma estação, que tinham os mesmos valores de velocidade e de direcção, com uma tolerância de 0,5 m/s para a velocidade e de 3° para a direcção de escoamento (com uma função criada no Matlab). Com estes dados, foram seleccionados os dados experimentais das estações P042 e P385 que tinham os mesmos tempos de medição. Toda esta selecção de dados foi efectuada para as mesmas alturas de medição, para dados da estação P384 a 30 m de altura foram seleccionados valores a 30 m para as

outras estações e a para 60 o processo foi análogo tendo em atenção que não foram obtidos dados da estação P042, porque não existiam para essa altura ao solo.

4.3.2 Análise de erros

A concordância entre os dados experimentais e os resultados das simulações foi avaliada através de médias pesadas de valores absolutos de erros relativos.

Para isto a que muitas vezes se chama validação do modelo, foram calculados erros relativos para a velocidade, direcção e intensidade turbulenta para todas as alturas de medição e direcções de vento recorrendo à equação 4.4. Os valores dos erros relativos podem ser consultados no apêndice E.

$$E_r = \frac{\phi_n - \bar{\phi}}{\bar{\phi}} \quad (4.4)$$

$\bar{\phi}$ é a média dos valores dos dados das estações resultantes do processo de filtragem, para uma variável genérica, que pode ser velocidade horizontal, direcção ou intensidade turbulenta.

ϕ_n é o valor da simulação para a variável genérica.

Depois foram calculadas médias pesadas desses erros relativos a partir da equação 4.5.

$$\overline{E_r} = \sum_{i=1}^{Dim.} peso_i \cdot |E_{r_i}| \quad (4.5)$$

Peso para os sectores Sudeste e Noroeste: O parâmetro $peso_i$ tem em conta a relevância proporcional de um dado erro relativo. Por exemplo, para a determinação da média pesada dos erros relativos para o sector Sudeste na estação P385, o $peso_i = \frac{dim.amostra.E_{r_i}.SE}{dim.amostra.SE}$. Em que $dim.amostra.E_{r_i}.SE$ é o numero de dados resultantes do processo de filtragem, usadas para o cálculo do erro relativo numa direcção Sudeste (dimensão da amostra). E $dim.amostra.SE$ é a dimensão da amostra ou numero total de dados que foram usados no cálculo dos erros relativos para todas as direcções Sudeste. Para o sector Noroeste o cálculo dos pesos é análogo.

Peso para diferentes alturas de medição: Para a média pesada para diferentes alturas de medição, por exemplo para 30 m o $peso_i = \frac{dim.amostra.E_{r_i}.30m}{dim.amostra.total}$. Em que $dim.amostra.E_{r_i}.30m$ é a dimensão da amostra de um dado erro relativo para 30 m de altura, e $dim.amostra.total$ é a dimensão da amostra total ou numero total de dados que foram usados no cálculo de todos os erros relativos que estão no apêndice E.

Peso por sector e altura: Para a média pesada por sector e altura, no cálculo do $peso_i$ teve-se em conta a dimensão da amostra para uma dada altura de medição e direcção em relação à dimensão total da amostra para todas as direcções e alturas de medição.

Média pesada dos valores absolutos dos erros relativos por sector

A tabela 4.2, com as médias pesadas dos erros para o sector Noroeste, Sudeste e global, mostra que os erros a Sudeste são maiores que a Noroeste e que os erros de intensidade de turbulência são, no geral, muito maiores que os verificados para a velocidade e para a direcção para a estação P385,

Tabela 4.2: Média pesada dos valores dos erros relativos de P385 para o sector Sudeste, Noroeste e global

P385	Er_Vh (%)	Er_Dir (%)	Er_It (%)
Sudeste	3,85	1,93	14,78
Noroeste	14,66	10,22	16,98
Er_med_global	6,84	4,23	15,39

Média pesada dos valores absolutos dos erros relativos para diferentes altitudes

Os erros apresentados na tabela 4.3 têm em conta o peso das amostras em função da altura (a 30 e a 60 metros) para as estações P042 e P385, o que permite uma avaliação numa perspectiva da influência da altura nos erros da solução numérica. Com isto, pode-se afirmar que a altura não teve aparentemente influência nos erros determinados, contudo em relação à comparação dos erros entre a velocidade, direcção e intensidade turbulenta a conclusão é a mesma que foi descrita no parágrafo anterior, ou seja, os erros de intensidade turbulenta são sempre maiores.

Tabela 4.3: Média pesada dos valores absolutos dos erros relativos de P042 e P385 para diferentes alturas

	Er_Vh (%)	Er_Dir (%)	Er_It (%)
P042_30	4,51	1,66	10,86
P385_30	3,65	1,71	7,14
P385_60	3,20	2,53	8,25

Média pesada dos valores absolutos dos erros relativos específicos

Para uma análise mais específica dos erros, foram calculados erros pesados médios para cada estação em função da altura e do sector. Estes erros podem ser consultados na tabela 4.4, e as conclusões que resulta da sua observação são idênticas às das tabelas anteriores. No entanto, neste caso não são tão perceptíveis mas permite complementar e reforçar essas mesmas conclusões.

Tabela 4.4: Média pesada dos erros relativos específicos para todas as estações para cada sector e altura

		Sudeste			Noroeste		
		Er_Vh (%)	Er_Dir (%)	Er_It (%)	Er_Vh (%)	Er_Dir (%)	Er_It (%)
30 m	P042	9,72	3,84	28,46	11,30	3,45	13,18
	P384			11,24			35,89
	P385	5,84	1,79	15,59	14,67	9,47	17,23
60 m	P384			20,08			28,51
	P385	2,20	2,06	14,11	14,66	10,79	16,79

Média pesada dos valores absolutos dos erros para o *shear factor*

Para os erros absolutos de *shear factor* o processo de filtragem foi ligeiramente diferente. A referência usada foi o valor de velocidade e de direcção numérico de cada estação a 60 metros de altura, com a mesma tolerância anteriormente utilizada. Com isto obtinham-se os valores experimentais correspondentes a 60 metros e depois eram seleccionados os valores dessas estações a 30 metros de altura para os mesmos tempos de medição. Para a estação P042 não foi possível calcular erro absoluto, visto não existir dados para duas alturas.

O *shear factor* foi determinado a partir da equação 4.6.

$$SF = \frac{\log \left(\frac{Vh_{60m}}{Vh_{30m}} \right)}{\log \left(\frac{60}{30} \right)} \quad (4.6)$$

O erro absoluto foi calculado através da equação 4.7.

$$E_a = SF_n - SF_e \quad (4.7)$$

Para o *shear factor* foi determinado o erro absoluto em vez de relativo, uma vez que os valores de *shear factor* são muito próximos de 0 o que resultava em erros relativos muito grandes.

Na tabela 4.5 estão os erros absolutos médios pesados por sector Noroeste, Sudeste e globais. Estes apresentam valores baixos excepto para o sector Noroeste mais especificamente para P384 a Noroeste.

Os erros de *shear factor* que estão no apêndice E são erros absolutos para cada direcção determinadas a partir da equação anterior. Nesta tabela é de notar que o erro de *shear factor* a Noroeste na estação P384 é predominantemente negativo.

Tabela 4.5: Média pesada dos valores absolutos dos erros para o *shear factor* por sector e globais

		Ea_SF	Ea_globais
Sudeste	P384	0,07	0,05
	P385	0,01	
Noroeste	P384	0,15	0,13
	P385	0,04	

Conclusões finais:

1. Na globalidade os erros de velocidade e de direcção são pequenos, o que é indicativo de uma boa aproximação da simulação aos dados medidos nas estações. Ao contrário, a intensidade turbulenta apresenta erros mais elevados, o que indica que a simulação para a turbulência não é tão boa como para a velocidade e direcção.
2. Os erros de *shear factor* são na generalidade pequenos excepto para o sector Noroeste mais especificamente para P384 a Noroeste.
3. Esta análise de erros constitui uma tentativa de validação do modelo, não poderá ser vista como uma prova de que as simulações são inequivocamente uma aproximação válida à realidade. Isto porque, os erros foram calculados para duas estações, a P042 e a P385, tendo como estação de referência a P384, e pode não ser representativo do erro em toda a área do parque eólico.

4.4 Análise dos campos em função da topografia

O escoamento sobre terreno não uniforme não é fácil de caracterizar. Cada colina, vale, depressão, árvore, etc cria uma perturbação no padrão do escoamento geral, de modo que o padrão de vento detalhado de cada paisagem é único. No entanto, é possível isolar alguns padrões de escoamentos típicos em torno de obstáculos específicos.

Antes de comentar os campos, é importante discutir o conceito de separação de escoamento. O escoamento sobre uma superfície plana normalmente adere a esta; contudo é possível que se separe da superfície. Um gradiente de pressão contrário pode levar o escoamento a abrandar, parar ou mesmo a adquirir um sentido inverso ao inicial. Isto acontece quando o escoamento passa sobre uma descontinuidade da superfície (por exemplo uma depressão). O escoamento não se consegue adaptar totalmente à topografia, separa-se da superfície e é criada uma área de baixa pressão, que aspira parte desse escoamento, criando frequentemente vórtices turbulentos a sotavento. Estes turbilhões que se formam a sotavento contribuem para formar uma esteira muito turbulenta. É deste modo que a turbulência mecânica é gerada à superfície. Aqui o escoamento em torno de obstáculos topográficos é classificado em função da ocorrência, ou não, de separação do escoamento.

Para determinação dos campos de intensidade turbulenta foi necessário o recurso à equação 4.8, uma vez que o campo de intensidade que é determinado, por defeito, no FLUENT não tem aplicação para escoamentos atmosféricos, mas sim para aplicações industriais como tubos (para mais informações consultar FLUENT 6.3 User's Guide [2]).

$$IT = \frac{\sqrt{\frac{2}{3} \cdot k}}{Vh} \quad (4.8)$$

Quanto à velocidade horizontal também teve de ser calculada pela equação 4.9, visto que o FLUENT só determina velocidades para as três componentes.

$$Vh = \sqrt{V_x + V_y} \quad (4.9)$$

No que respeita à inclinação vertical foi igualmente usado uma equação para a sua determinação, que é a seguinte:

$$IV = \arctan\left(\frac{V_z}{Vh}\right) \quad (4.10)$$

4.4.1 Campos de velocidade

Nos campos de velocidades que estão no apêndice B, é notório que a velocidade do escoamento atinge o seu máximo na zona dos aerogeradores, no geral. Isto porque esta é a zona do campo com maior altitude e onde o escoamento sofre um aumento da altitude relativa que vai obrigar a uma constrição vertical e que resulta numa aceleração. A sotavento é de notar a presença de zonas de baixas velocidades (zona de vales), visto que aqui tem em média uma altitude mais baixa do que a zona dos aerogeradores, o que provoca uma descida do escoamento obrigando a que o escoamento adquira velocidades mais baixas. Apesar de a sotavento a altitude ser muito semelhante à zona a barlavento do parque eólico, as velocidades a sotavento são geralmente mais baixas que a barlavento, isto pode ser explicado pela existência de mais separação de escoamento a sotavento do que a barlavento, isto devido ao escoamento depois de passar a zona mais montanhosa (zona do parque) não ter capacidade que tinha a barlavento de estar tão junto ao terreno, como pode ser visto na figura 4.3.

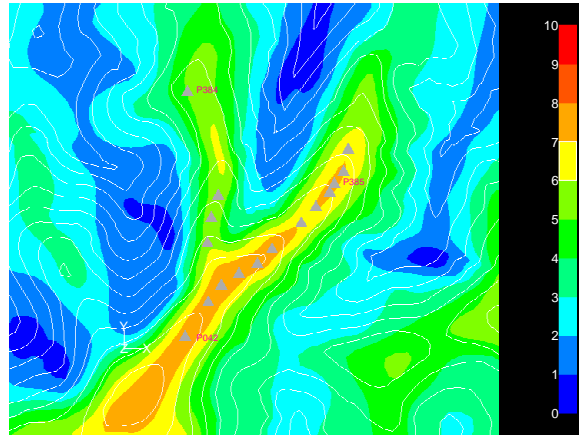


Figura 4.3: Campo de velocidades para a direcção 105° a 44 metros de altura

Para as direcções 135° e 142° existe uma zona de alta velocidade, fora da zona dos aerogeradores, a Sudeste, visto que o vento para estas direcções é obrigado a subir devido à presença de montes nesta zona, figura 4.4. Outro aspecto importante que resulta da observação dos campos de velocidades é a permanência de uma zona de baixa velocidade independentemente da direcção do escoamento, que coincide com uma depressão entre as cristas que formam o V característico da forma da disposição dos aerogeradores. Esta zona de baixa velocidade pode ser explicada por ocorrer sempre separação de escoamento nessa depressão seja qual for a direcção do escoamento.

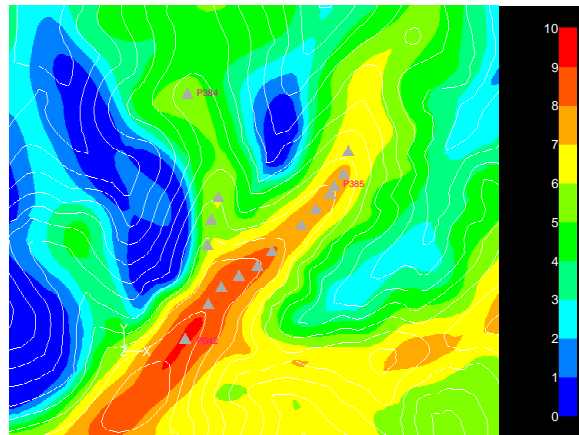


Figura 4.4: Campo de velocidades para a direcção 142,5° a 126 metros de altura

4.4.2 Campos de inclinação vertical

Para os campos de inclinação vertical, apêndice B na zona dos aerogeradores a inclinação vertical, está geralmente entre -8° e 8°, o que respeita a norma de segurança para aerogeradores IEC-61400-1 [12], excepto para algumas direcções em alguns aerogeradores.

Normalmente os aerogeradores mais afectados por inclinações superiores a 8° ou inferior a -8° são o WTG 6,7 e 8 que estão localizados isoladamente dos restantes a Noroeste para direcções de vento do sector Noroeste. A barlavento do parque eólico a inclinação do escoamento é predominantemente positiva e com valores muito elevados, muito superiores ao verificado no parque eólico. A sotavento ocorre o oposto. Isto acontece porque a barlavento do parque o escoamento está na globalidade com movimento ascendente enquanto que a sotavento é o oposto, devido à topologia do terreno, isto é, até ao parque a altitude do terreno vai aumentando depois vai diminuindo na direcção do vento. Contudo, nessas zonas existem áreas com inclinação de escoamento de sinal oposto ao que reina nessas mesmas zonas, que poderá ser explicado pela presença de colinas e/ou pela separação de escoamento, como está ilustrado na figura 4.5

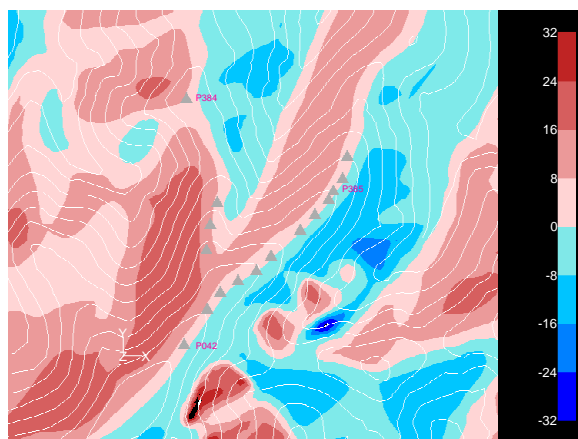


Figura 4.5: Campo de inclinação vertical para a direcção $307,5^\circ$ a 85 metros de altura

4.4.3 Campos de intensidade turbulenta

À medida que o escoamento se aproxima da crista de vertentes abruptas onde está localizado o parque eólico, o escoamento move-se para cima, passa sobre a crista (zona do parque) com um aumento da velocidade no topo. Parte deste escoamento é deflectido e encaminhado para baixo (ainda a barlavento do parque) onde ocorre uma área de baixa pressão e formam-se remoinhos a barlavento ao longo da base da vertente. Aqui o escoamento ocorre em sentido oposto ao do escoamento principal e os ventos são fracos, instáveis e turbulentos. Torna a haver separação de escoamento a sotavento do obstáculo e formam-se remoinhos a sotavento. O vento à superfície tem aqui também um sentido contrário ao do escoamento principal e os ventos são fracos e instáveis. Por isso, nos campos de intensidade turbulenta que estão representados no apêndice B, as zonas de maior turbulência são as que estão localizadas a barlavento e a sotavento do parque, assim como na depressão que foi descrita na subsecção 4.4.1. Na zona do parque é de destacar que a intensidade turbulenta não deverá ser superior a 18 %, o que para a grande maioria dos campos não se verifica valores que ultrapassem essa margem. Contudo nas direcções de 135° e $142,5^\circ$ para

WTG 6,7 e 8 que estão localizados isoladamente dos restantes a Noroeste a intensidade turbulenta é superior ao aconselhável, principalmente a 44 metros do solo, figura 4.6.

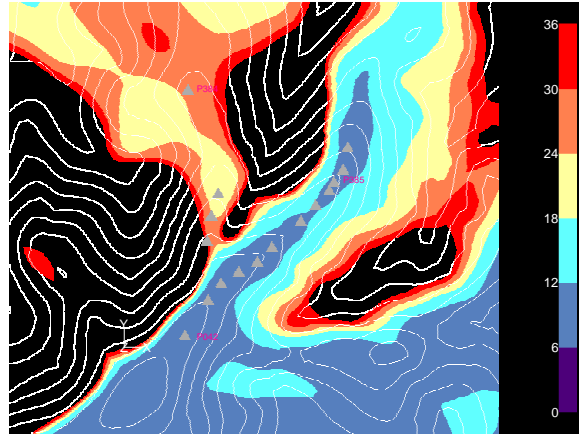


Figura 4.6: Campo de intensidade turbulenta para a direcção 135° a 44 metros de altura

4.5 Análise dos perfis e de valores pontuais

Os perfis de velocidade, de inclinação vertical, de intensidade turbulenta e de *shear factor* permitem, fazer uma análise do vento mais localizada nos aerogeradores em vez da análise global que é feita nos campos. É possível avaliar a forma dos perfis e prever se os aerogeradores vão ter o comportamento desejável em termos de aproveitamento energético e de esforços a que estarão sujeitos. Nesta secção será analisado o *shear factor*, o que não foi efectuado na análise de campos, o que introduzirá um elemento adicional de avaliação das características do escoamento sobre o parque eólico, para isso foi usada a equação 4.11 para a determinação do perfil de *shear factor*.

$$SF = \frac{\log\left(\frac{Vh_2}{Vh_1}\right)}{\log\left(\frac{Z_2}{Z_1}\right)} \quad (4.11)$$

Para maior facilidade de observação dos perfis, estes foram organizados de maneira a estarem dispostos em função do sector a que corresponde a direcção de escoamento (sector Sudeste ou Noroeste) por aerogerador. Logo existem dois gráficos por cada aerogerador, um para Sudeste e outro para Noroeste, que estão representados no apêndice C. Já no que respeita aos valores pontuais, que podem ser consultados no apêndice D, estes estão organizados por aerogerador para todas as direcções de escoamento para as alturas de interesse prático. Estas alturas são a altura inferior das pás do aerogerador (44 metros), altura da nacelle (85 metros) e a altura superior das pás (126 metros).

4.5.1 Perfis e valores pontuais de velocidade

Para analisar a forma do perfil e usar uma escala única, comum a todos os perfis, a velocidade foi normalizada tendo como referência a velocidade a 85 metros de altura do solo (que pode ser consultado nas tabelas que estão no apêndice D).

Para alturas entre 44 e 126 metros (nos gráficos dos perfis para além destes limites que estão representados por linhas a traço interrompido, também está assinalada a altura da nacelle por uma linha a traço ponto), que coincidem com a zona abrangida pelas pás dos aerogeradores, geralmente a velocidade não apresenta grande variação, como pode ser visto tanto nos perfis, figura 4.7 como nos valores pontuais a diferentes alturas, apêndice D.

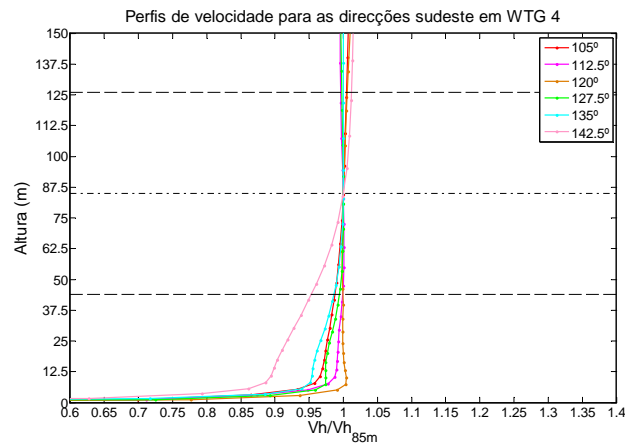


Figura 4.7: Perfis de velocidade no aerogerador WTG 4 para o sector Sudeste

Nos perfis é perceptível a forma próxima do uniforme para a grande maioria dos aerogeradores, o que é muito positiva em termos de esforços de torção aplicados às pás, uma vez que para um perfil uniforme as forças aplicadas pelo vento estão equitativamente distribuídos pelas pás. No entanto, para os aerogeradores WTG 6, WTG 7 e WTG 8 para direcções de escoamento do sector Sudeste, apresentam perfis com gradientes de velocidade muito elevados, e como consequência disso os valores pontuais para as alturas de interesse prático também são muito variáveis, como está ilustrado na figura 4.8 os perfis de velocidade de WTG 6. Isto poderá ser crítico na medida em que os esforços de torção a que esses aerogeradores estão sujeitos, para direcções de Sudeste, poderão ser elevados ao ponto de comprometer o desempenho ideal desses aerogeradores.

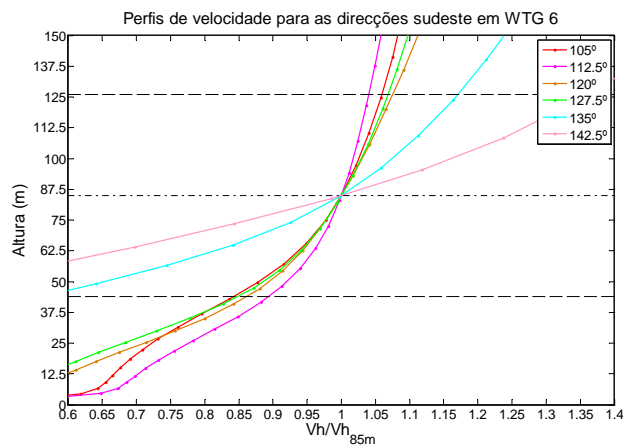


Figura 4.8: Perfis de velocidade no aerogerador WTG 6 para o sector Sudeste

4.5.2 Perfis e valores pontuais de inclinação vertical

Ao contrário dos perfis de velocidade, nesta subsecção o que interessa, é analisar os valores de inclinação vertical e verificar se estão dentro do intervalo aconselhável, segundo a norma IEC61400-1 [12] , -8° até 8° (nas tabelas de valores pontuais, os valores de inclinação que estão fora deste intervalo estão assinalados a vermelho). Com isto, numa perspectiva geral do comportamento do escoamento, nos aerogeradores WTG 3, 4 e 5 para as direcções do sector Sudeste a inclinação do escoamento tende a ser superior quando comparado com o sector Noroeste, isto pelo que pode ser visto nos perfis, como mostra a figura 4.9 para WTG 3,

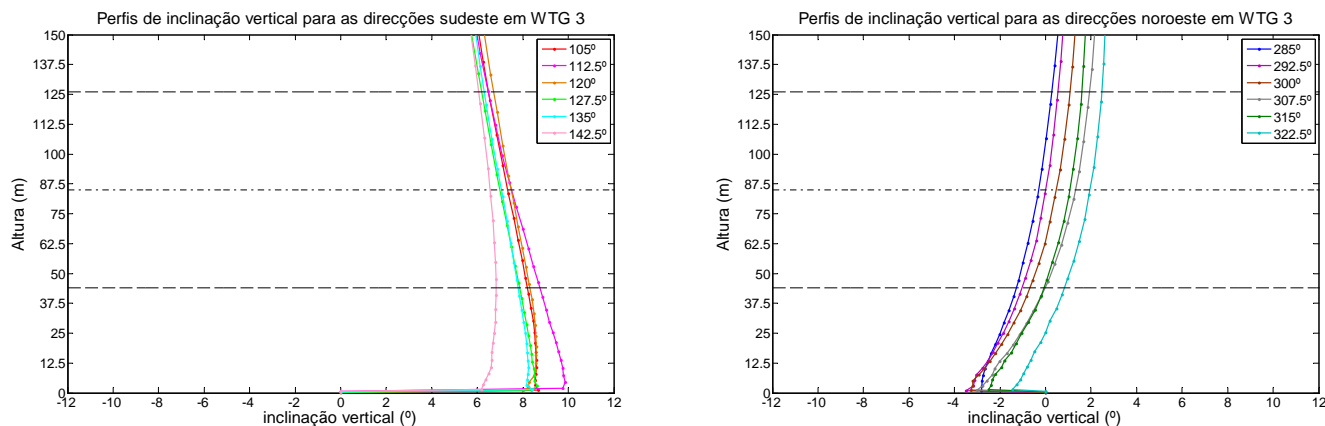


Figura 4.9: Perfis de inclinação vertical no aerogerador WTG 3

Em WTG 3 para todas as direcções Sudeste excepto para a direcção $142,5^{\circ}$ a inclinação é muito próximo de 8° para a altura de 44 metros, enquanto para a direcção 142° a inclinação é muito menor. Depois para alturas superiores a inclinação diminui chegando a ter inclinações inferiores a 8° para todas as direcções Sudeste tanto para 85 metros do solo como a 126, como pode ser visto nos valores pontuais, tabela D.3.

No aerogerador WTG 4 para as direcções que estão compreendidas entre 120° e 135° , a inclinação do escoamento é superior a 8° , já para as restantes direcções a Sudeste são muito inferiores, para 44 metros de altura. Para a altura de 85 metros, a direcção de 120° é a única em que a inclinação não é inferior a 8° , tabela D.4.

Para WTG 5 as direcções de escoamento em que a inclinação vertical é superior ao aconselhável são as que estão entre 105° e $127,5^\circ$ incluindo as mesmas, para 44 metros. Para uma altura de 85 metros as direcções que ainda continuam a ter inclinações superiores a 8° são as 105° e $112,5^\circ$, tabela D.5.

Nos aerogeradores WTG 6 e 7, ao contrário dos anteriores, apresentam perfis para o sector Noroeste mais deslocados no sentido da maior inclinação do que os de Sudeste. No aerogerador WTG 6 os valores são sempre superiores a 8° , para as alturas pontuais de 44, 85 e 126 metros. Já para WTG 7 a 44 metros para direcções compreendidas entre $292,5^\circ$ e 315° os valores de inclinação são superiores ao limite, verificando-se depois que para as alturas de 85 e 126 metros para todas as direcções Sudeste esses valores passam a ser todos superiores ao limite, tabelas D.6 e D.7.

Os restantes perfis apresentam mais equilíbrio em termos da diferença entre a inclinação para o sector Sudeste e Noroeste. De destacar que em WTG 10 e 11 ocorrem escoamentos com inclinação superior ao que seria desejável.

4.5.3 Perfis e valores pontuais de intensidade turbulenta

À semelhança da análise que foi feita para a inclinação vertical, também aqui vai ser avaliado o perfil e os valores pontuais nos aerogeradores destacando as características mais importantes no sentido de descrever a evolução da intensidade turbulenta, entre as altitudes que são abrangidas pelas pás do aerogerador, e verificando se os valores nestes níveis de cota não ultrapassam o que é recomendado, que é 18 % (os que ultrapassam estão destacados a vermelho nas tabelas que estão no apêndice D). Numa abordagem geral à análise dos perfis de intensidade turbulenta, aparentemente para direcções no sector Noroeste não ocorre escoamentos que sejam superiores ao limite recomendado de 18 %, já para o sector Sudeste o mesmo não se aplica. Para as direcções de escoamento de Sudeste, os aerogeradores que ficam sujeitos a intensidades turbulentas acima dos 18 % são; WTG 6, 7 e 8 mas não para todas as direcções de Sudeste, como mostra a figura 4.10 para WTG 6.

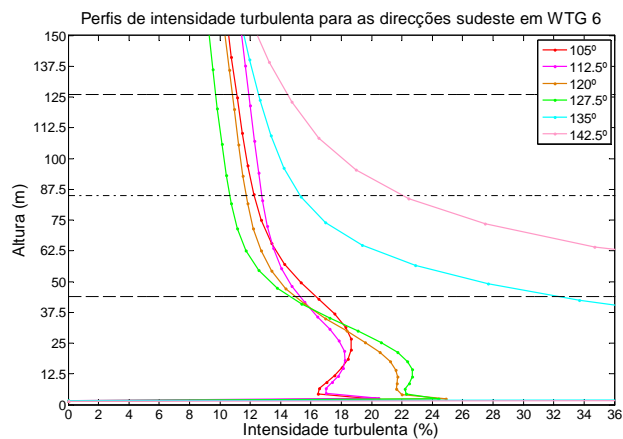


Figura 4.10: Perfis de intensidade turbulenta no aerogerador WTG 6 para o sector Sudeste

Em WTG 6, com a ajuda das tabelas dos valores pontuais, é fácil verificar quais direcções para as quais a turbulência não é a ideal para o aerogerador. Essas direcções são; 135° e 142,5°, tendo registado nesta ultima uma intensidade de 73,8 % a 44 metros. Apesar da intensidade na direcção 135° registar um valor acima de 18 %, é de referir que para as alturas de 85 e 126 metros essa intensidade é inferior. No que respeita à outra direcção a intensidade turbulenta apresenta valores superiores ao limite, pelo menos até 85 metros, no entanto a 126 metros não se verifica o mesmo, como mostra a tabela D.6.

Em relação ao WTG 7, as direcções mais problemáticas são a 112,5°, 135° e a 142,5°, onde os valores de intensidade turbulenta para 44 metros ultrapassam o limite recomendado. A direcção 142,5° é a mais crítica, na medida em que a intensidade turbulenta para esta direcção é sempre maior, para qualquer cota, em relação às outras direcções. Na direcção 142,5, opostamente ao que ocorre para as outras direcções, a intensidade turbulenta é sempre superior ao limite dos 18 % até, no mínimo, à altura de 85 metros, tabela D.7.

No aerogerador WTG 8 , a intensidade turbulenta regista valores acima do limite para todas as direcções do sector Sudeste excepto para a direcção de 105°. Como para WTG 8 a maior intensidade turbulenta que é obtida para 44 metros é menor que as verificadas para os aerogeradores analisados anteriormente, é lógico que para alturas de 85 metros a intensidade esteja dentro dos limites desejáveis para todas as direcções, o que não acontecia com os aerogeradores já tratados, tabela D.8.

Como análise final, os restantes aerogeradores apresentam para todas as direcções perfis bastante perto do uniforme e dentro dos limites recomendados. Ao contrário dos aerogeradores que foram anteriormente analisados, em particular para as direcções Sudeste. No entanto, para o sector Noroeste os perfis destes, à semelhança dos restantes aerogeradores, são menos variáveis e mais próximos do perfil uniforme com valores que são inferiores a 18 %, como está exemplificado na figura 4.11 para WTG 1, Esta análise de turbulência é importante, tal como para as outras propriedades

de vento que foram analisadas, para saber quais os aerogeradores mais problemáticos sobre o ponto de vista do aproveitamento energético e de esforços a que estarão sujeitos.

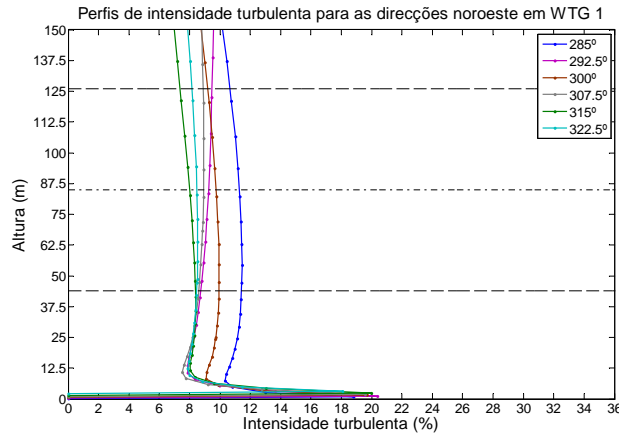


Figura 4.11: Perfis de intensidade turbulenta no aerogerador WTG 1 para o sector Noroeste

4.5.4 Perfis e valores pontuais de *shear factor*

Segundo a norma IEC61400-1 [12] de segurança dos aerogeradores, o *shear factor* deverá estar situado entre os valores 0 e 0,2 (os que estão fora destes limites estão destacadas a vermelho nas tabelas que estão no apêndice D). Com isto, o objectivo da análise nesta subsecção é de destacar os aerogeradores mais problemáticos, e avaliar o comportamento do *shear factor*. Depois desta análise mais focalizada, é conveniente analisar o *shear factor* dos restantes aerogeradores no geral.

Pela observação dos perfis, os aerogeradores que apresentam valores de *shear factor* mais elevados são o WTG 6, 7 e 8 para direcções de escoamento de Sudeste, como mostra por exemplo a figura 4.12 para WTG 7,

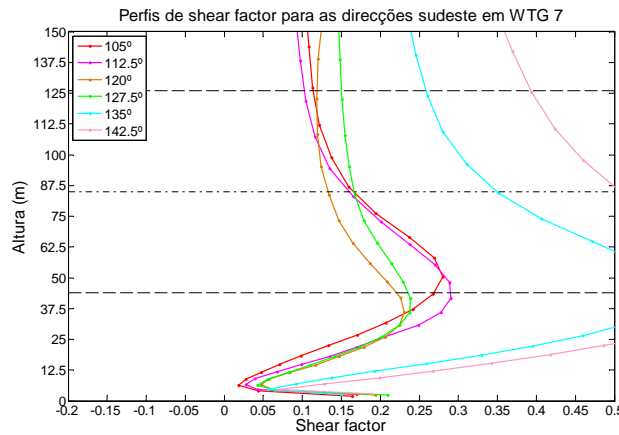


Figura 4.12: Perfis de *shear factor* no aerogerador WTG 7 para o sector Sudeste

O aerogerador WTG 6, pela consulta das tabelas de valores pontuais, constata-se que o *shear*

factor é superior ao limite imposto pela norma para todas as direcções Sudeste, sobretudo para as direcções de 135° e $142,5^\circ$, em que esses valores são muito mais elevados que para as outras direcções, para 44 metros de altura. Depois para alturas superiores, o *shear factor* diminui para valores abaixo dos 0,2, como pode ser visto para 85 e 126 metros nas tabelas, excepto para as direcções mais críticas (135° e $142,5^\circ$), como mostra a tabela D.6.

No aerogerador WTG 7 os perfis de *shear factor* apresentam um comportamento muito similar ao WTG 6 tanto para o sector Sudeste como para o de Noroeste. Tal como WTG 6 o WTG 7 tem valores pontuais de *shear factor* que ultrapassam 0,2 para todas as direcções Sudeste, para 44 metros de altura. Para as alturas de 85 e 126 metros o *shear factor*, apresenta valores inferiores a 0,2 para quase todas as direcções, salvo as direcções de 135° e $142,5^\circ$, como é análogo ao aerogerador WTG 6, tabelas D.6 e D.7.

O aerogerador WTG 8 tem uma evolução de *shear factor* diferente de WTG 6 e 7, figura C.15. Para WTG 8 como acontecia para WTG 6 e 7, o sector mais crítico é o Sudeste, contudo nem todas as direcções Sudeste têm *shear factor* maior que 0,2, para 44 metros de altura, só a 105° é que não é. Em relação à altura de 85 metros existe desta vez mais direcções em que o *shear factor* é superior a 0,2, são elas as direcções $112,5^\circ$, 135° e $142,5^\circ$. Ao contrário do que possa parecer esta situação não é tão crítica como a que foi verificada em WTG 6 e 7, visto que a 85 metros de altura, apesar de existir mais direcções que registam valores de *shear factor* superior ao limite recomendado, esses valores são muito mais próximos de 0,2. A 126 metros de altura só existe a direcção $142,5^\circ$ em que o valor de *shear factor* não é o desejável, tabela D.8.

Quanto à análise dos restantes aerogeradores, o que é possível observar pelos perfis e pelos valores pontuais, é que os valores de *shear factor* não são muito problemáticos. Apesar de em muitos ocorrer valores negativos de *shear factor*, estes valores estão muito próximos de 0. Quanto à forma dos perfis eles aparentam ser muito regulares com a altura, com por exemplo mostra a figura 4.13.

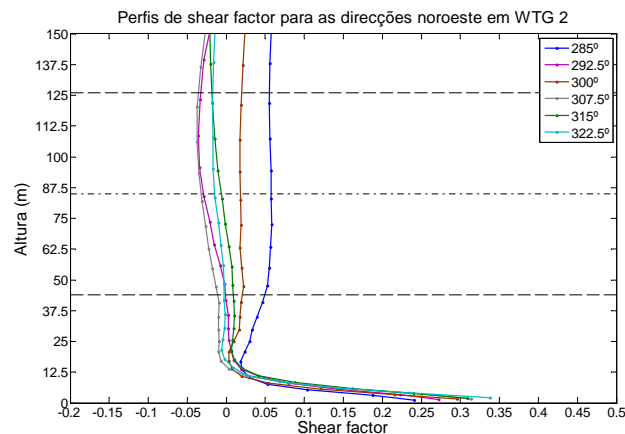


Figura 4.13: Perfis de *shear factor* no aerogerador WTG 2 para o sector Noroeste

4.6 Convergência

O resíduo total, é definido pela soma dos resíduos para todos os elementos do domínio, é adimensionalizado por uma grandeza representativa do caudal da variável no domínio, como pode ser visto em [2]. Para monitorizar a convergência do processo iterativo avalia-se esse resíduo para a continuidade, para as três componentes da velocidade, para a energia cinética turbulenta e para a taxa de dissipação turbulenta. Foi necessário estabelecer um critério de paragem do processo iterativo, esse critério só permitiria que o processo iterativo parasse quando o resíduo mais elevado correspondesse a um valor igual ou mais baixo do que 10^{-5} , esse resíduo mais alto pertencia sempre à continuidade. Contudo, não foi possível para algumas simulações obter um resíduo para a continuidade que fosse inferior a esse critério, como pode ser visto na tabela 4.6. Pela observação da tabela 4.6, é de notar o número de iterações necessárias para se obter convergência (paragem do processo iterativo) varia muito para as várias direcções. O critério de 10^{-5} foi o escolhido, visto que com este para todas as simulações o andamento dos resíduos (figura 4.14) aparentemente tendia para valores que não seriam muito mais baixos do que para critérios mais rigorosos, como 10^{-6} . No geral os resíduos têm o andamento que está representado na figura 4.14 para todas as direcções, atingindo no fim os resíduos e o número de iterações que estão na tabela 4.6.

Tabela 4.6: Resíduos e numero de iterações para cada direcção de escoamento

	Iterações	Continuidade
105°	850	8,1504e-06
112,5°	986	9,4114e-06
120°	1297	1,8985e-05
127,5°	1517	1,3602e-04
135°	957	9,7705e-05
142,5°	1287	9,7862e-06
285°	906	9,8360e-06
292,5°	1333	2,8441e-05
300°	955	1,6384e-04
307,5°	1354	1,5144e-05
315°	1136	2,8430e-05
322,5°	1129	1,1813e-05

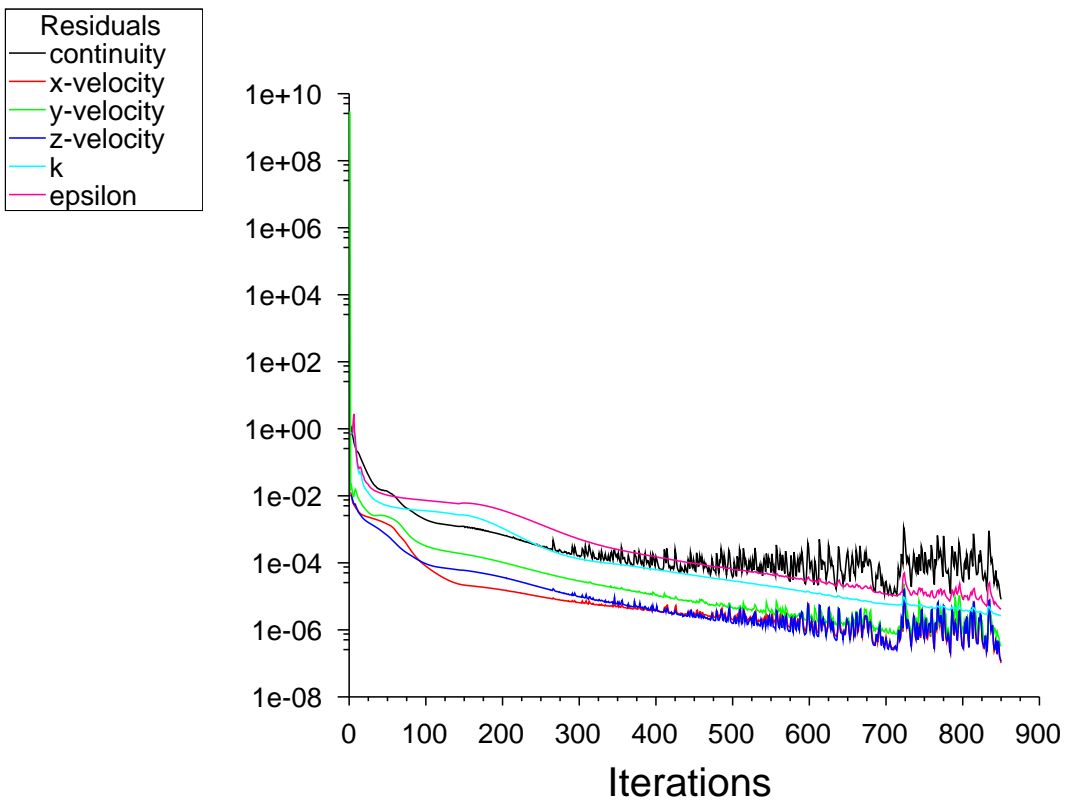


Figura 4.14: Evolução dos resíduos com o numero de iterações para 105°

Capítulo 5

Conclusões

Pretendeu-se com este trabalho caracterizar o vento na zona de um futuro parque eólico com aplicação comercial FLUENT.

Pela observação das rosas-dos-ventos para as três estações, as direcções mais importantes na perspectiva do aproveitamento energético localizam-se no sector Sudeste e Noroeste, que correspondem também às direcções de vento dominantes, por isso é que as simulações do escoamento atmosférico foram feitas para esses sectores

Os aerogeradores WTG 6, 7 e 8 revelaram-se os mais problemáticos na análise feita dos resultados numéricos das simulações. Estes registam a maior intensidade turbulenta, valor absoluto de inclinação vertical e os perfis de velocidades com maior gradiente em relação aos restantes aerogeradores do parque eólico, o que pode ter complicações ao nível dos esforços de fadiga e de aproveitamento energético.

As zonas de maior velocidade normalmente coincidem com o parque eólico, que será instalado, para as direcções de vento dominantes. Esta zona de maior velocidade é explicada pela topografia do terreno que é descrita como uma cumeada que tem uma forma que se assemelha a um V que está orientado para norte, e em redor dessa cumeada estão associados regiões de menor altitude.

As zonas de maior intensidade turbulenta situam-se nas zona fora do parque, ou seja a barlavento e sotavento do parque e na depressão entre as cumeadas que formam o V. Isto porque nestas zonas existe separação de escoamento e recirculação.

Os critérios que são sugeridos em [12], que é 18 % de intensidade turbulenta máxima, -8° a 8° de inclinação vertical do escoamento atmosférico e 0 a 0,2 de *shear factor*, pode-se dizer que são na sua maioria satisfeitos, no entanto os resultados das simulações tiveram que ser sujeitos a validação. Para isso recorreu-se à comparação dos resultados numéricos com os dados medidos pelas estações, através da determinação de erros para velocidade horizontal, direcção do vento, intensidade turbulenta e *shear factor*. Desta comparação chegou-se à conclusão que a intensidade turbulenta apresenta geralmente os maiores erros quer seja erros médios pesados por sector, quer

seja erros médio pesados por altura de medição, sendo a característica do escoamento mais difícil de validar.

O critério estabelecido para parar o processo iterativo foi de 10^{-5} para o resíduo da continuidade, no entanto para algumas direcções, o critério teve que ser aumentado para se obter convergência. Isto poderá ser explicado pela existência de zonas de recirculação junto as fronteiras de simetria que poderão dificultar a convergência ou por factores doutra natureza.

Bibliografia

- [1] Wind energy handbook
- [2] FLUENT 6.3 User's Guide, USA, 2008,
- [3] GAMBIT 2,3 User's Guide, 2008,
- [4] Matlab 7,8 User's Guide, 2009,
- [5] Suhas V. Patankar, Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, McGraw-Hill, USA, 1980
- [6] H. K. Versteeg, W. Malalasekera, An Introduction to Computational Fluid Dynamics – The Finite Volume Method, Longman Scientific & Technical, Essex, 1995,
- [7] Cebeci T. and Bradshaw, Momentum Transfer in Boundary Layers, Hemisphere. Publishing Corporation, New York, 1977
- [8] Joel H. Ferziger / Milovan Peric, Computational Methods for Fluid Dynamics, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, New York, 2002
- [9] Jerome Leroy, Wind field simulations at Askervein hill, Technical Report, Stage ingeneur, Ecole Centrale de Nantes, Vector CFD Consulting, 1999
- [10] A. R. Gravdahl, Meso scale modeling with a Reynolds Averaged Navier-Stokes Solver, 31th IEA Experts Meeting - State of the Art of Wind Resource Estimation, 1999
- [11] Xiaodong Zhang, CFD simulation of neutral ABL flows, Risø National Laboratory for Sustainable Energy, Technical University of Denmark, Roskilde, Denmark, 2009
- [12] International Standart, IEC 61400-1, third edition, 2005-08

Apêndice A

Funções Matlab

Rotação do terreno

```
function R=rotacao(Acord,pivotx,pivoty,angulo,limitexi,limitexs,limiteyi,limiteys)
A=Acord;
P=[pivotx,pivoty];
B=[A(:,1)-P(1,1),A(:,2)-P(1,2),A(:,3)];
[theta,rho,z]=cart2pol(B(:,1),B(:,2),B(:,3));
rot=theta(:,1)+(angulo*pi/180);
C=[rot,rho,z];
[x,y,h]=pol2cart(C(:,1),C(:,2),C(:,3));
F=[x,y,h]; FT=[F(:,1)+P(1,1),F(:,2)+P(1,2),F(:,3)];
d=size(FT,1);
R=zeros([d,3]);
for i=1:d
if ((FT(i,1)>=limitexi && FT(i,1)<=limitexs) && (FT(i,2)>=limiteyi && FT(i,2)<=limiteys))
R(i,:)= FT(i,:);
else
R(i,:)=R(i,:);
end
end
end
```

$$R(\sim \text{any}(R,2),:)=[];$$

Apêndice B

Campos

Campos de velocidade

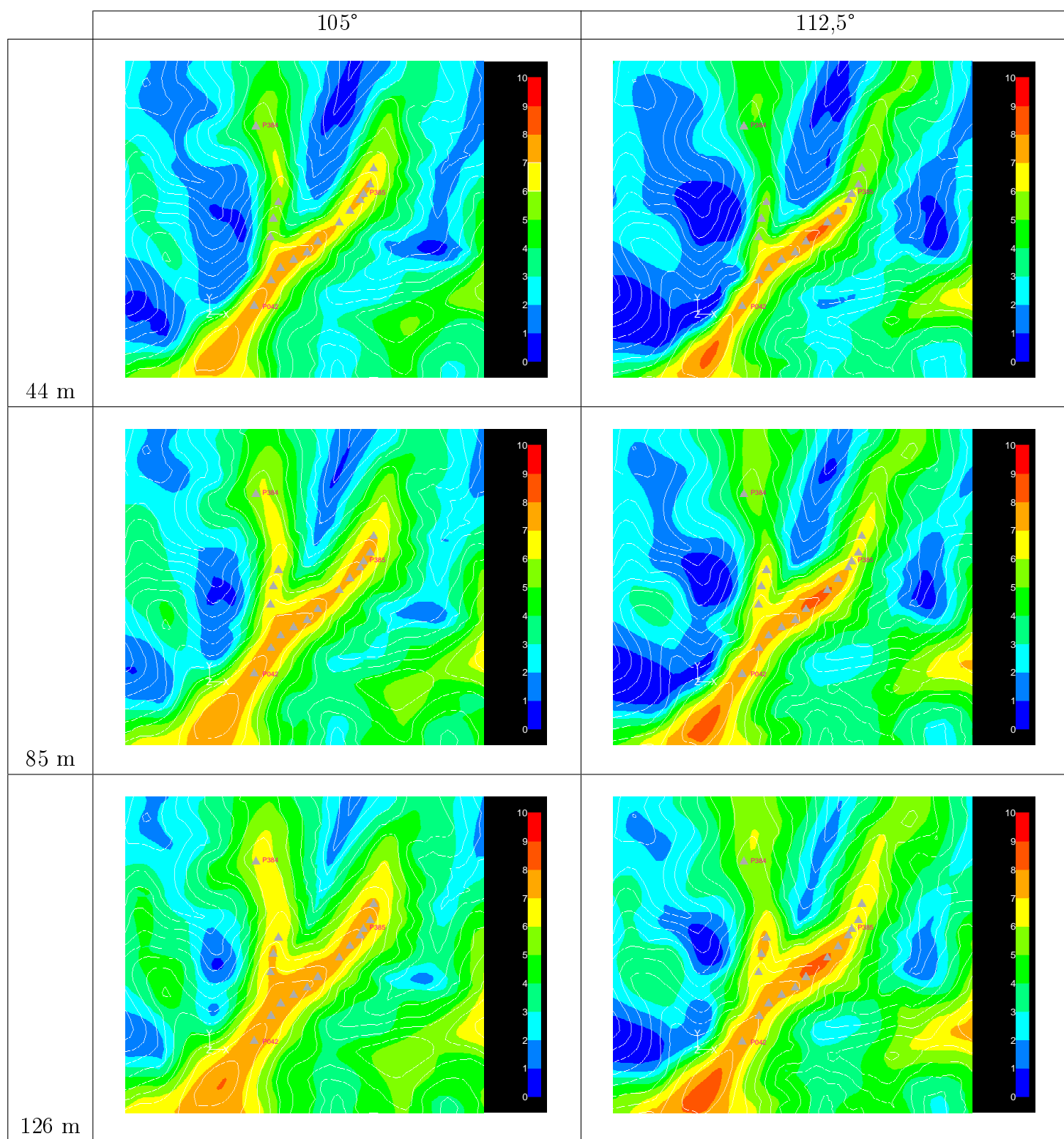


Figura B.1: Campos de velocidade (m/s) para as direcções 105° e 112,5°

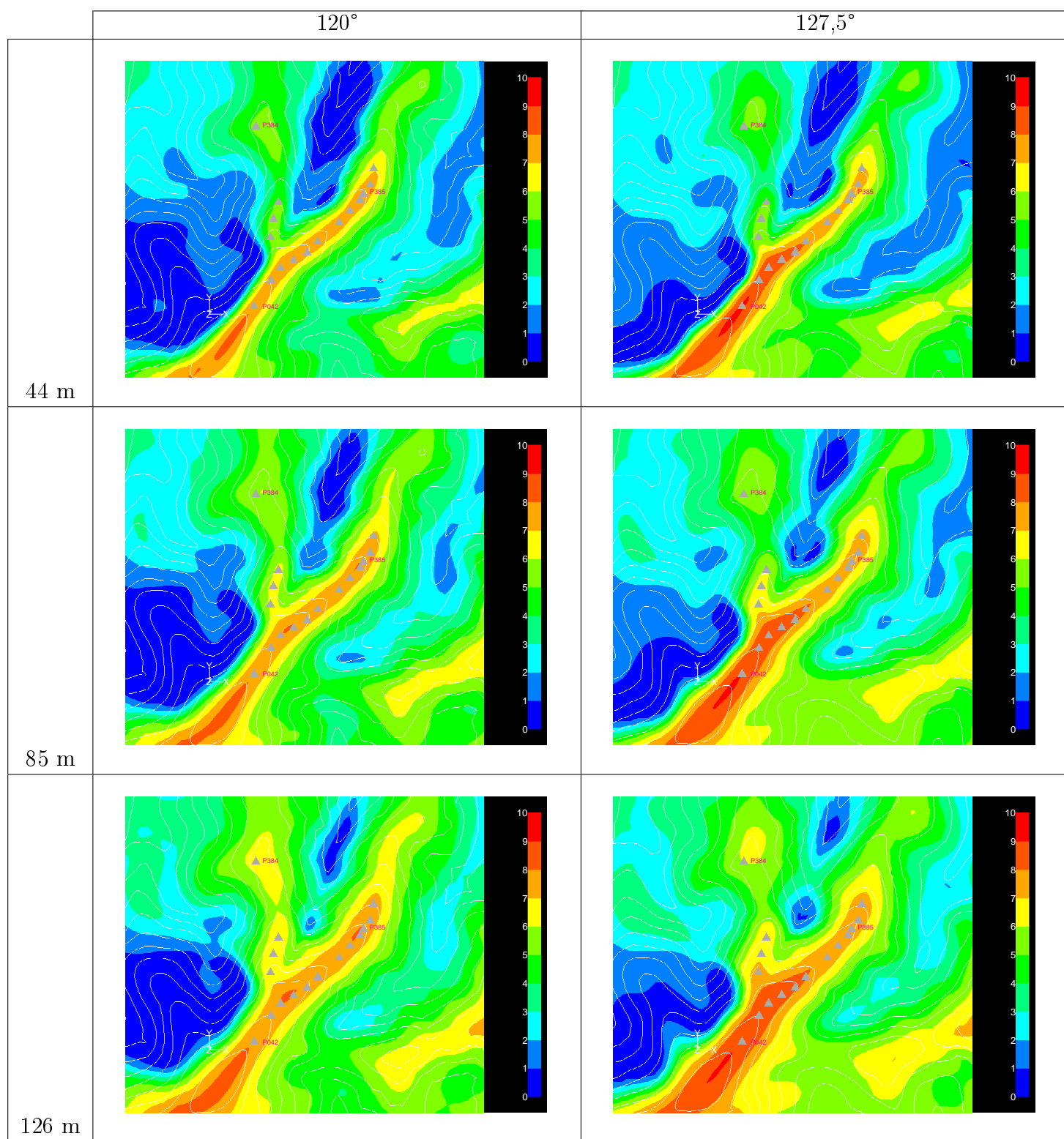


Figura B.2: Campos de velocidade (m/s) para as direcções 120° e 127,5°

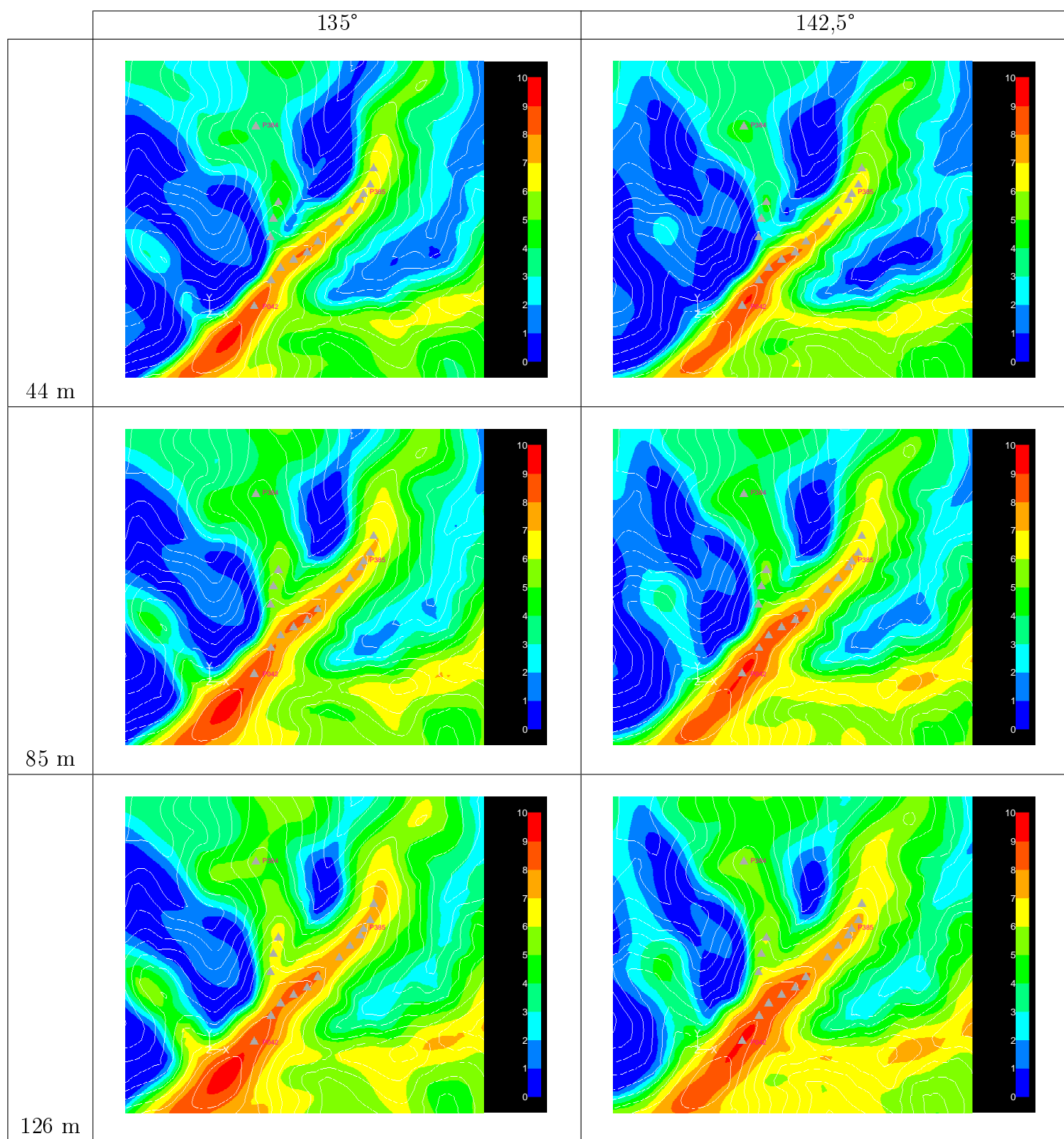


Figura B.3: Campos de velocidade (m/s) para as direcções 135° e 142,5°

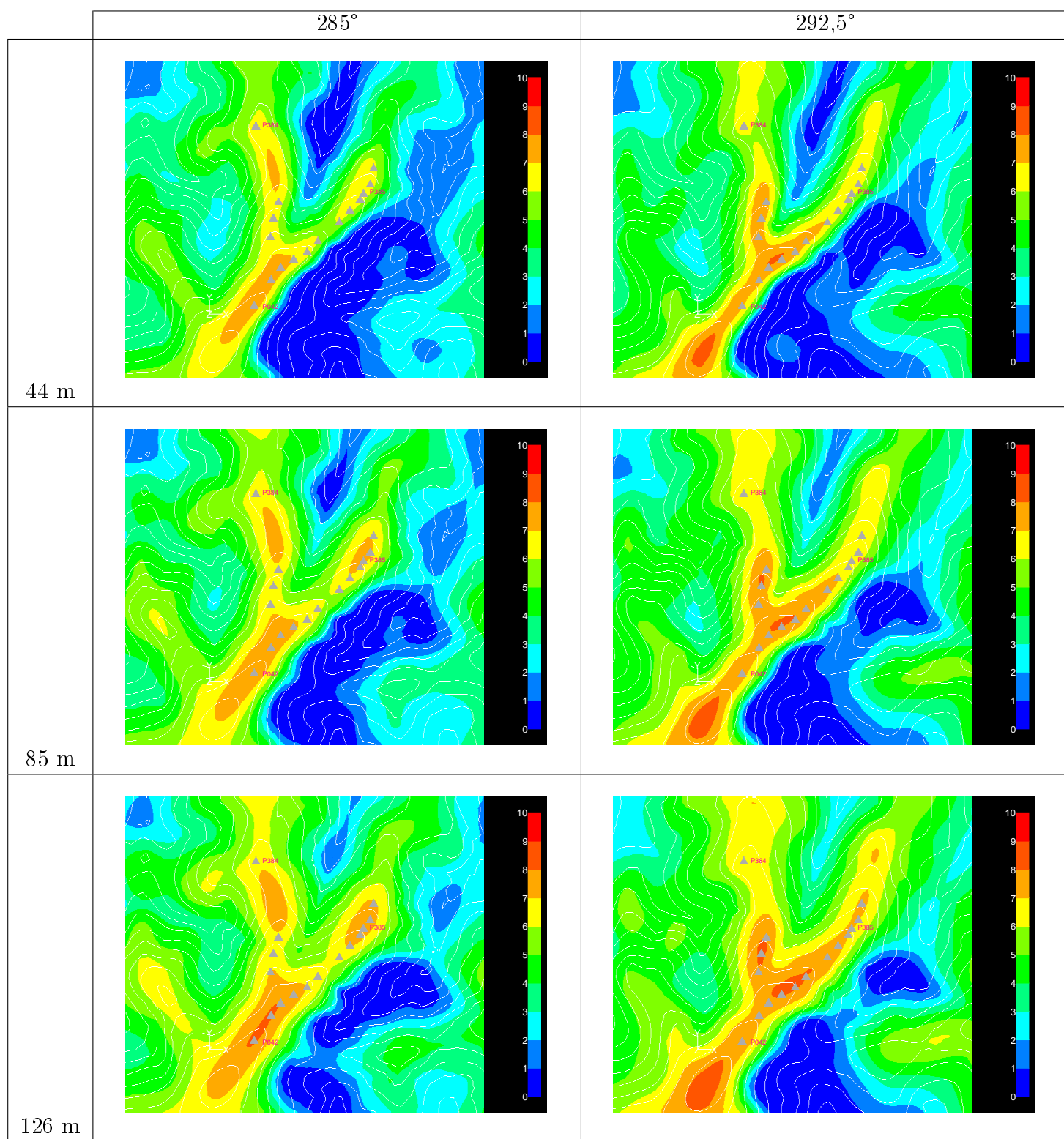


Figura B.4: Campos de velocidade (m/s) para as direcções 285° e 292,5°

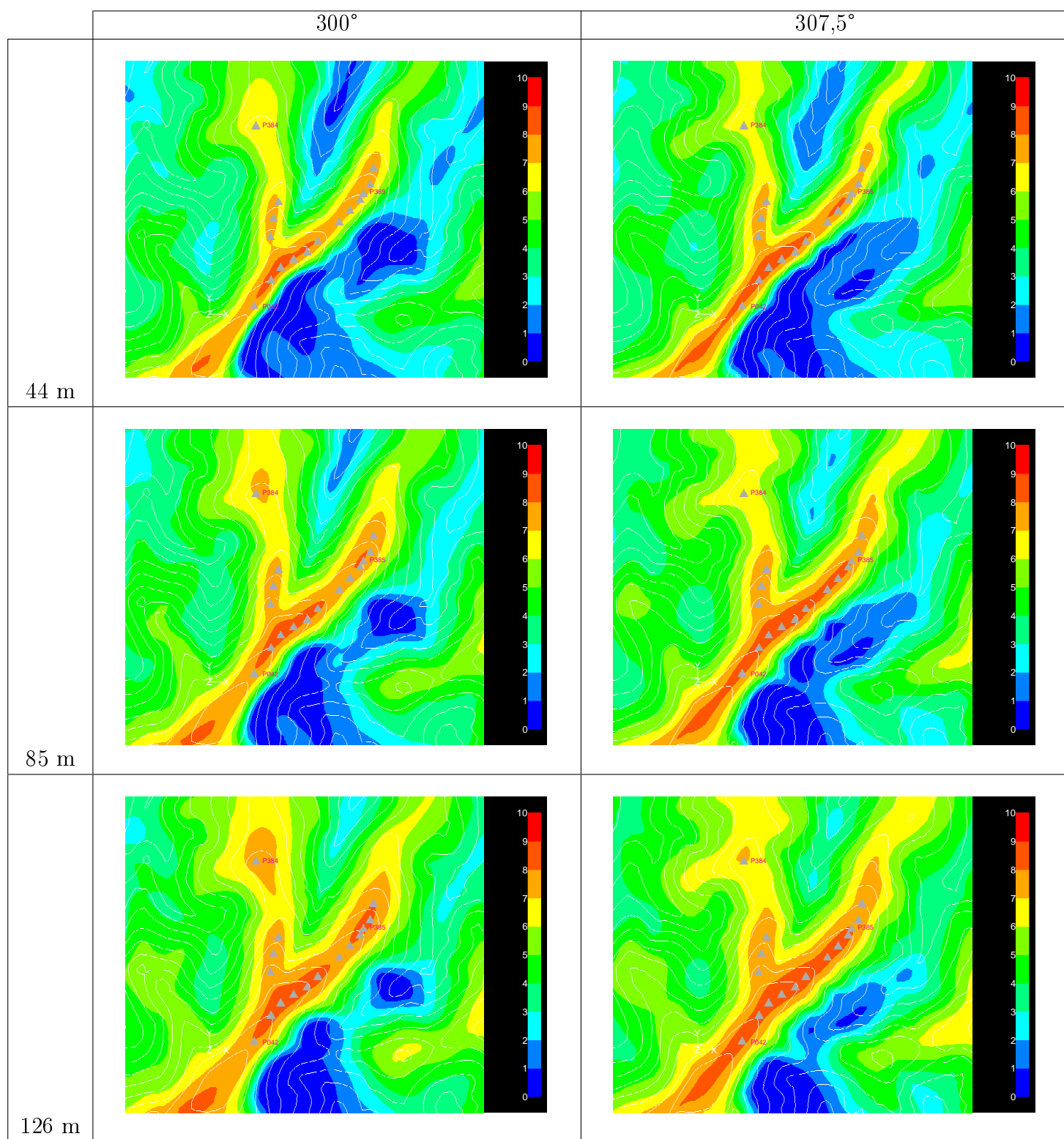


Figura B.5: Campos de velocidade (m/s) para as direcções 300° e 307,5°

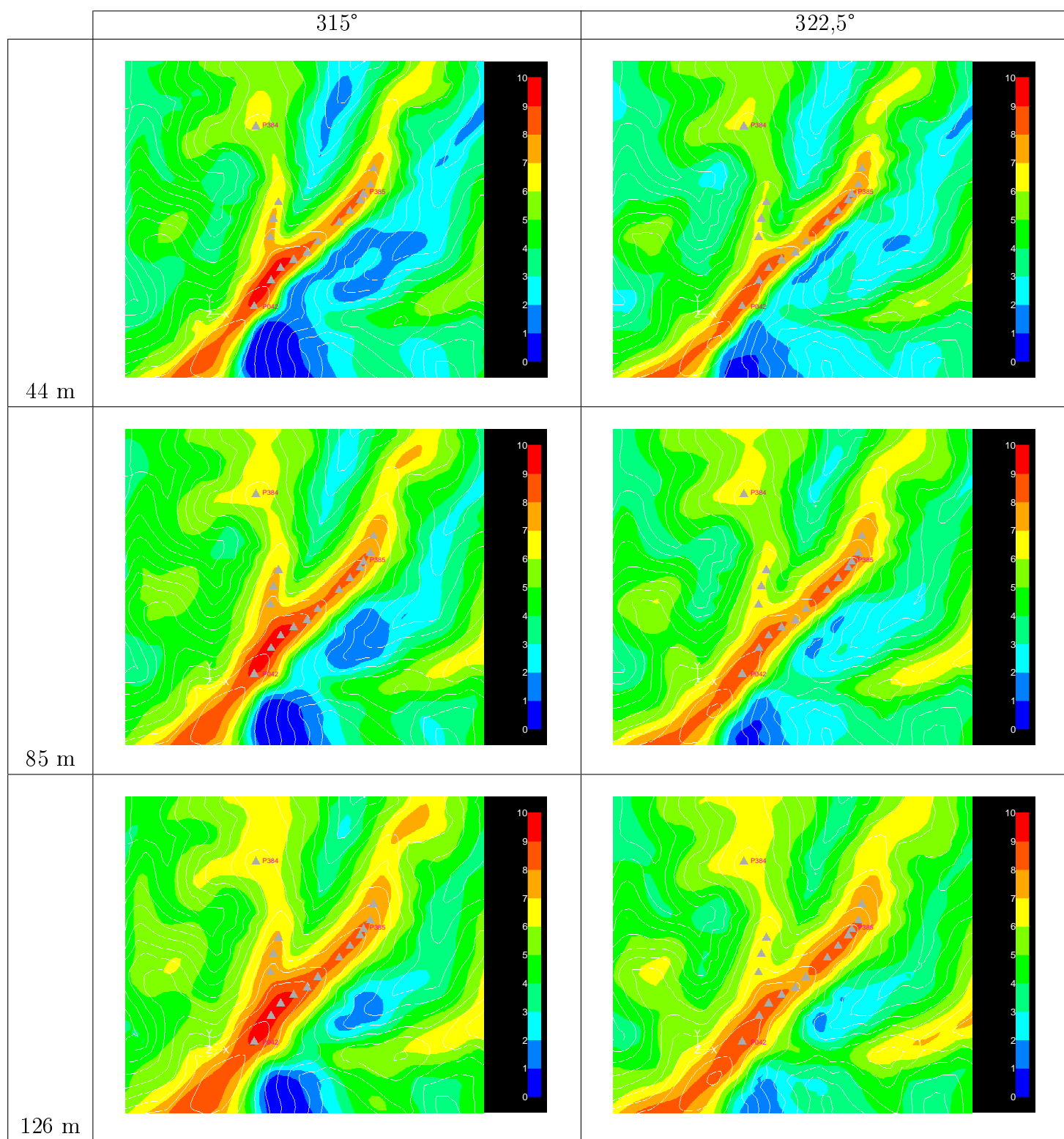


Figura B.6: Campos de velocidade (m/s) para as direcções 315° e 322,5°

Campos de inclinação vertical

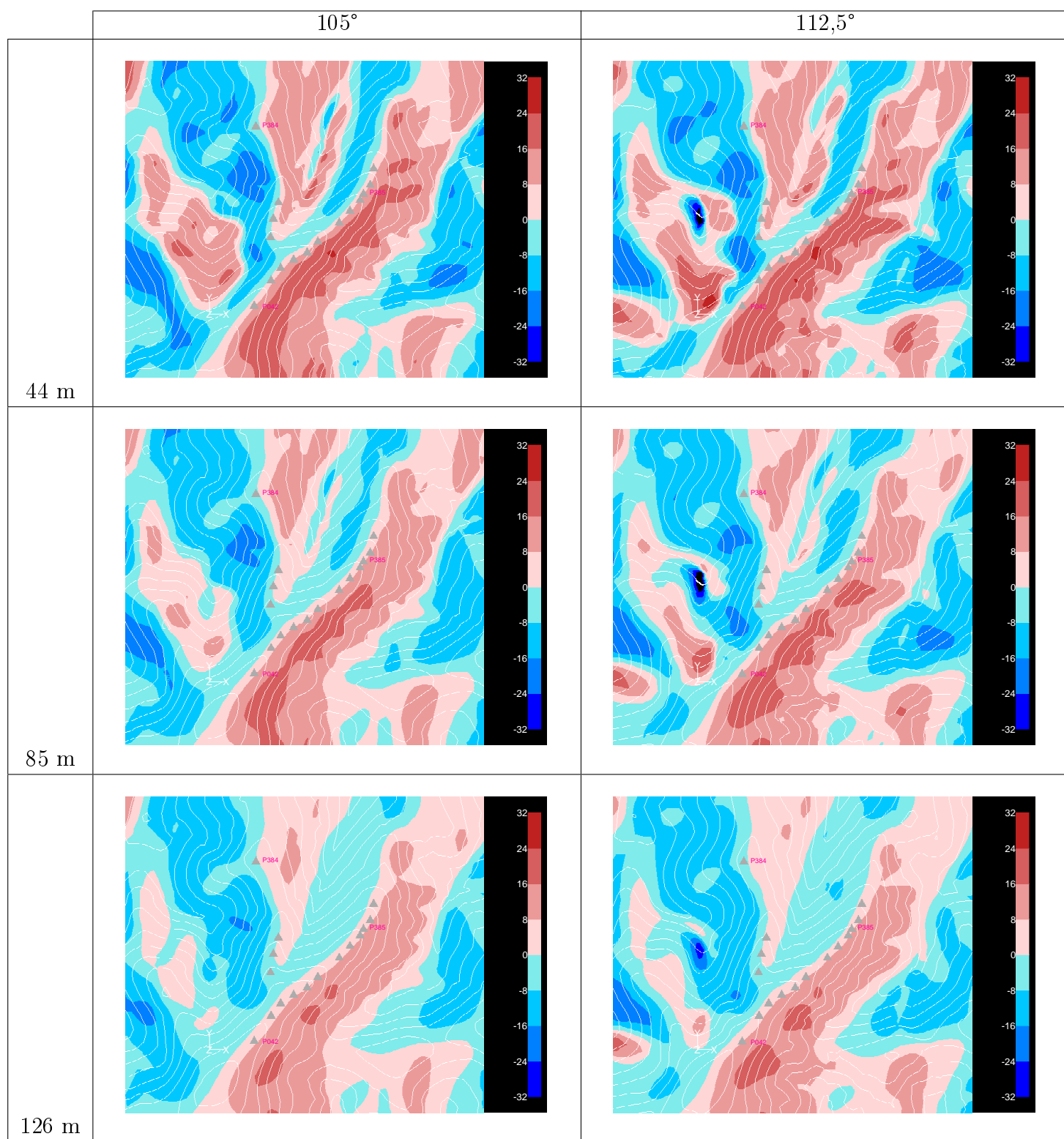


Figura B.7: Campos de inclinação vertical (°) para as direcções 105° e 112,5°

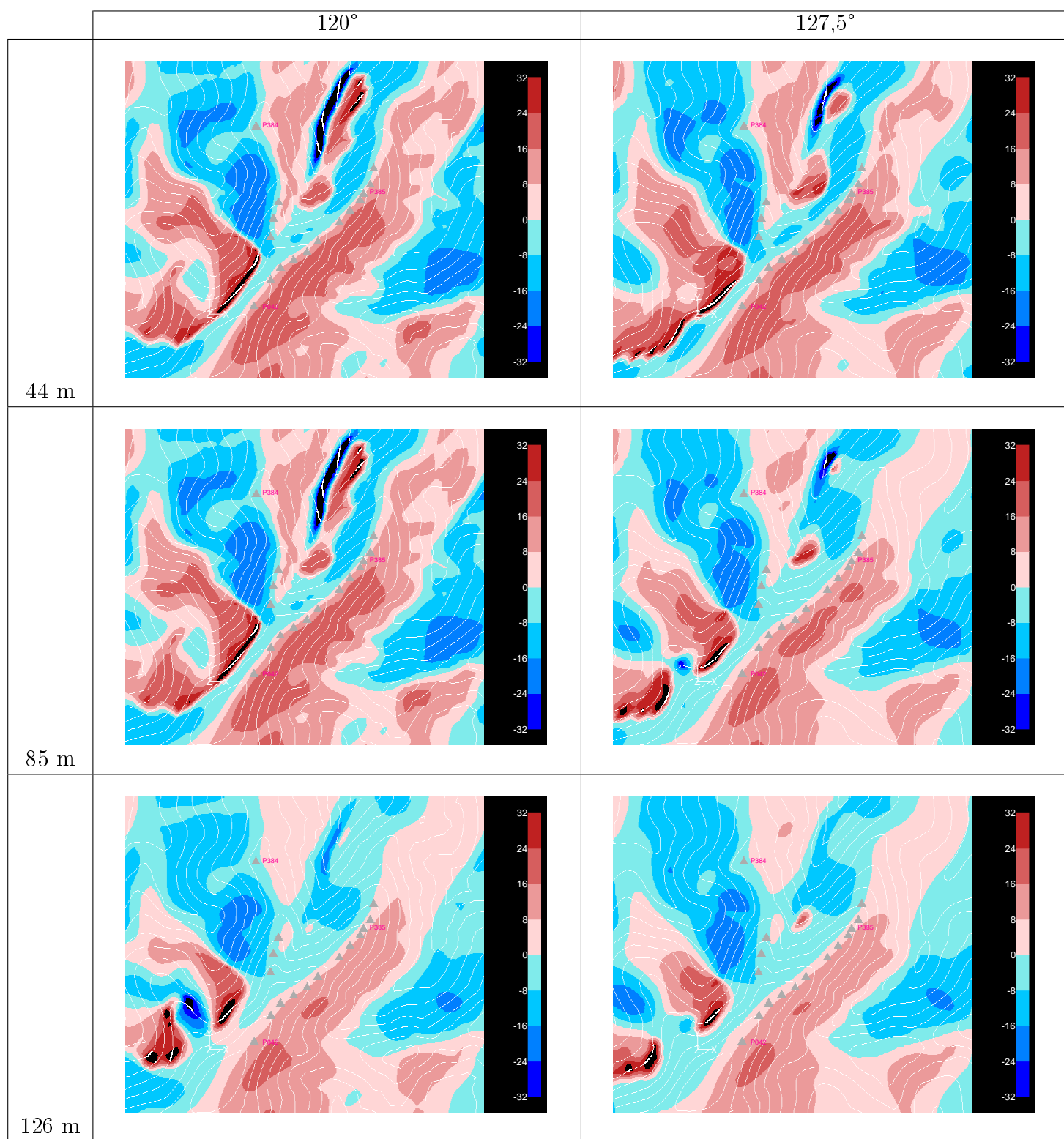


Figura B.8: Campos de inclinação vertical (°) para as direcções 120° e 127,5°

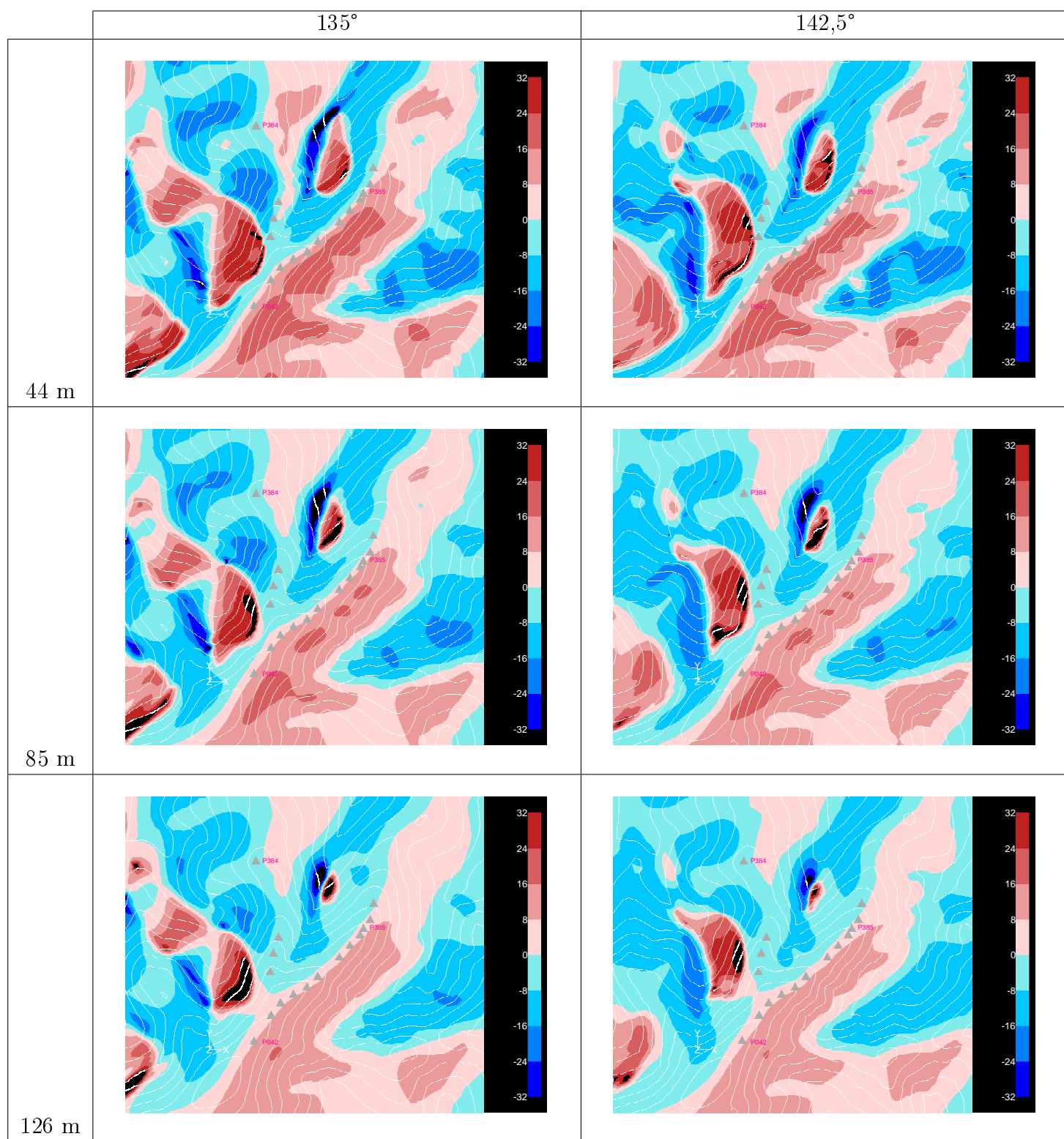


Figura B.9: Campos de inclinação vertical (°) para as direcções 135° e 142,5°

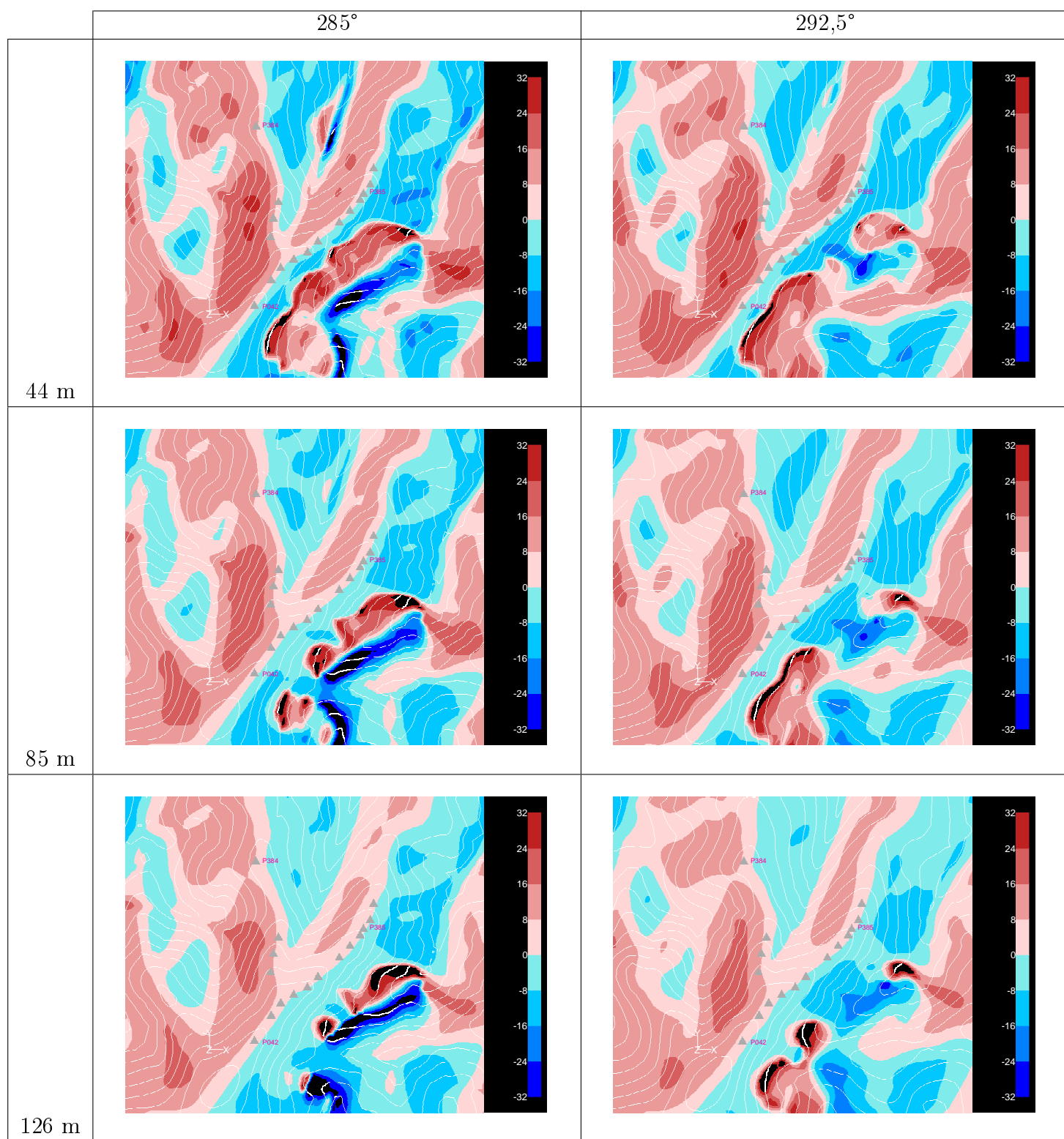


Figura B.10: Campos de inclinação vertical (°) para as direcções 285° e 292,5°

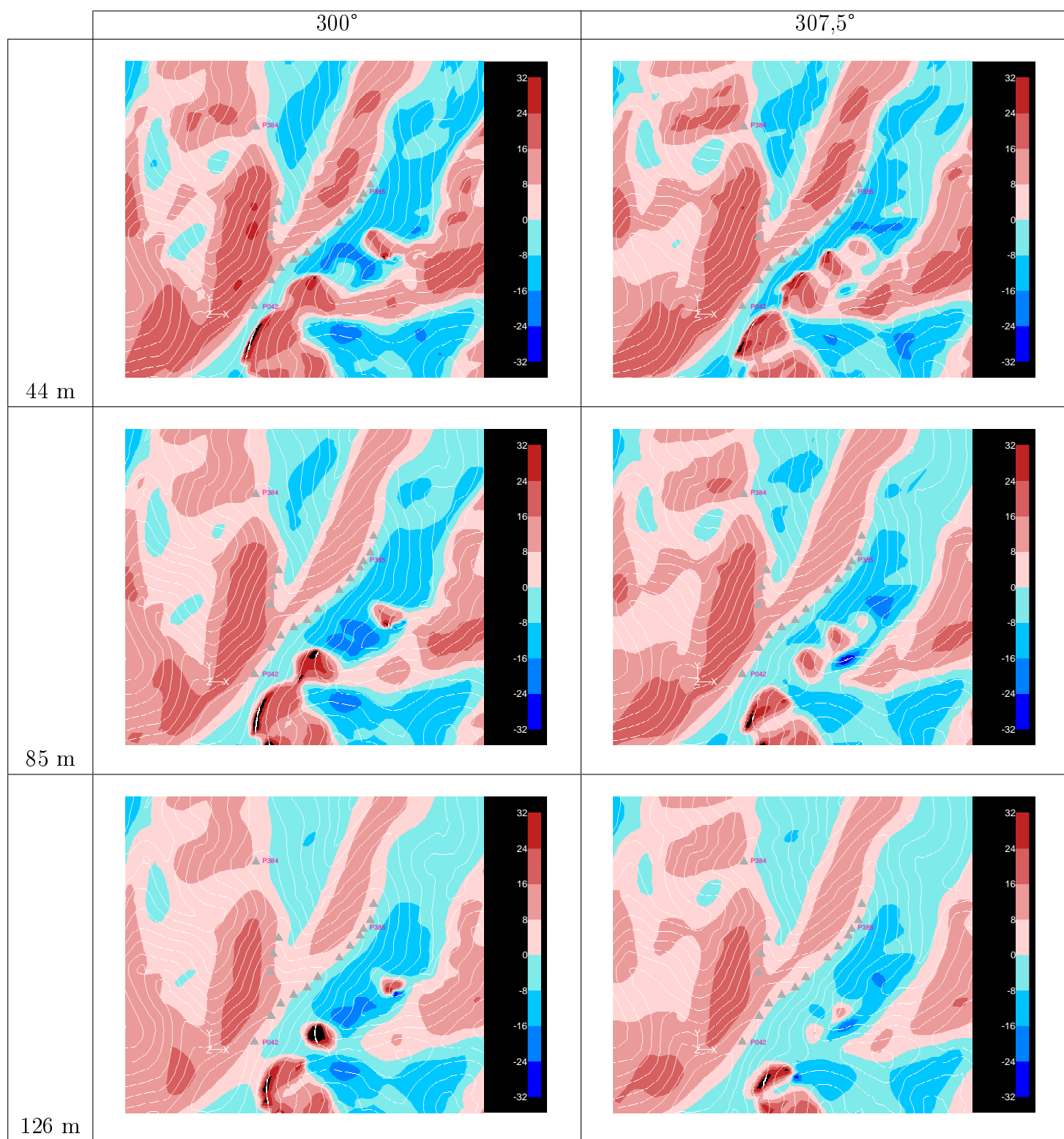


Figura B.11: Campos de inclinação vertical (°) para as direcções 300° e 307,5°

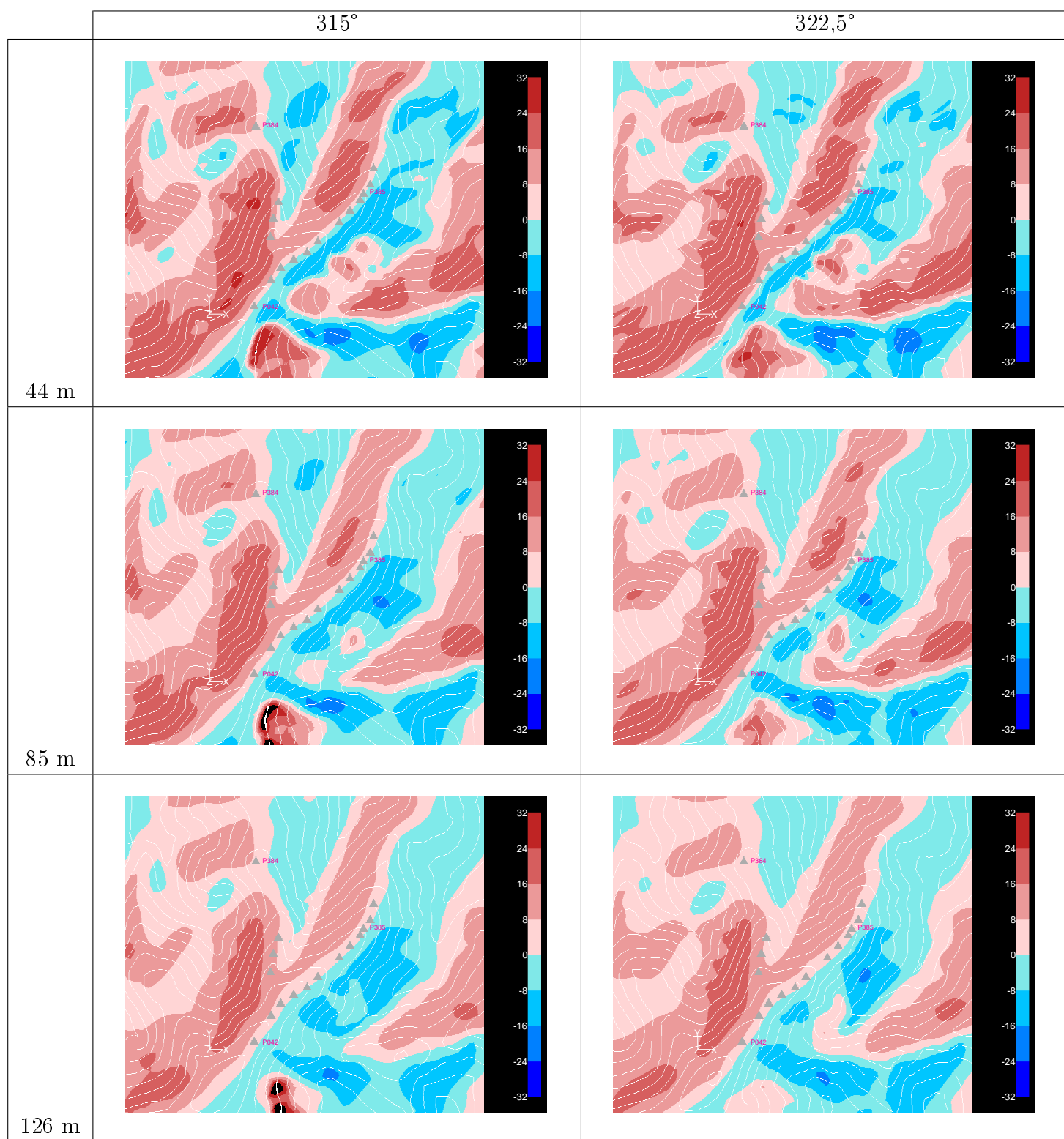


Figura B.12: Campos de inclinação vertical (°) para as direcções 315° e 322,5°

Campos de intensidade turbulenta

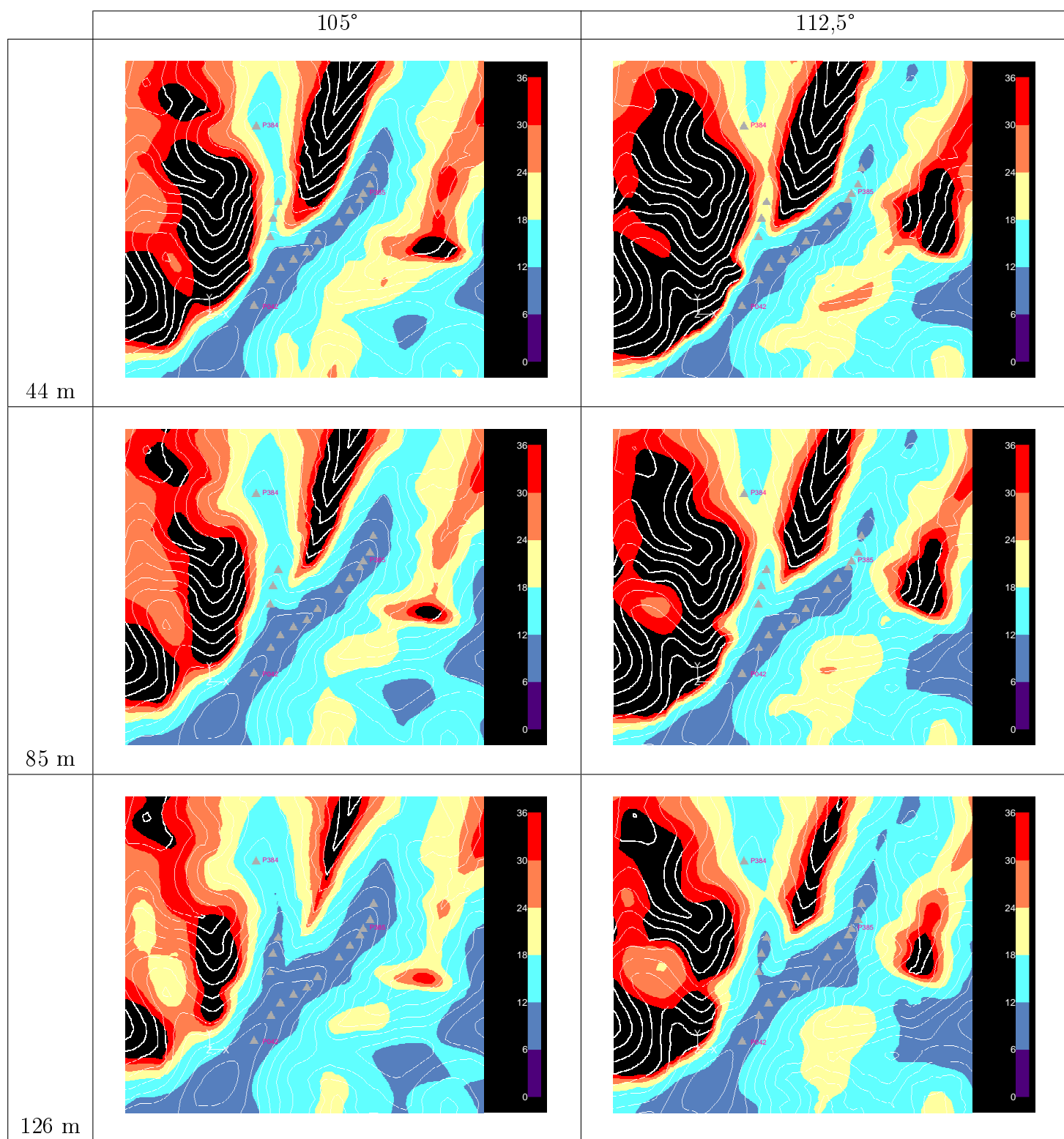


Figura B.13: Campos de intensidade turbulenta (%) para as direcções 105° e 107,5°

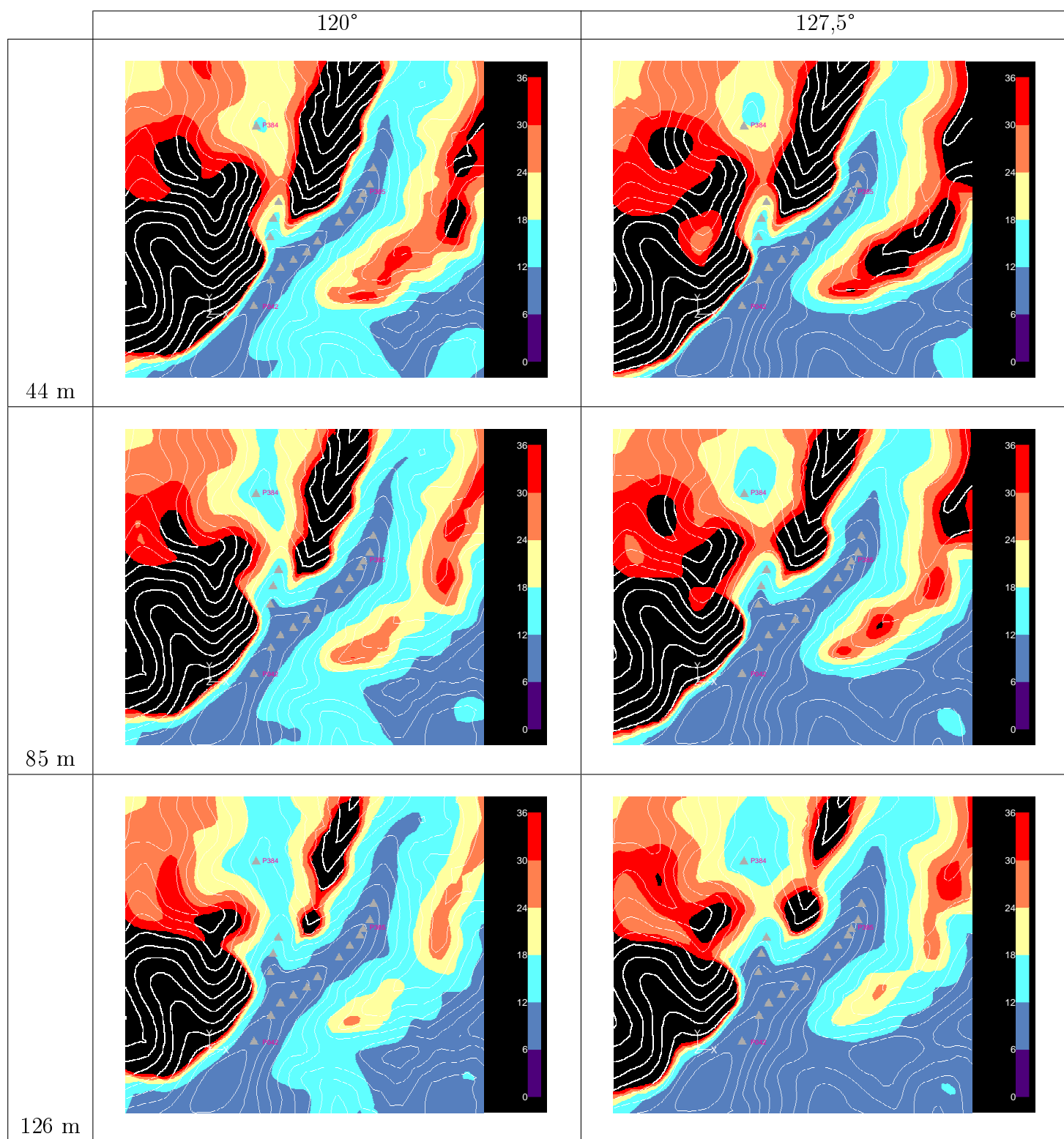


Figura B.14: Campos de intensidade turbulenta (%) para as direcções 120° e 127,5°

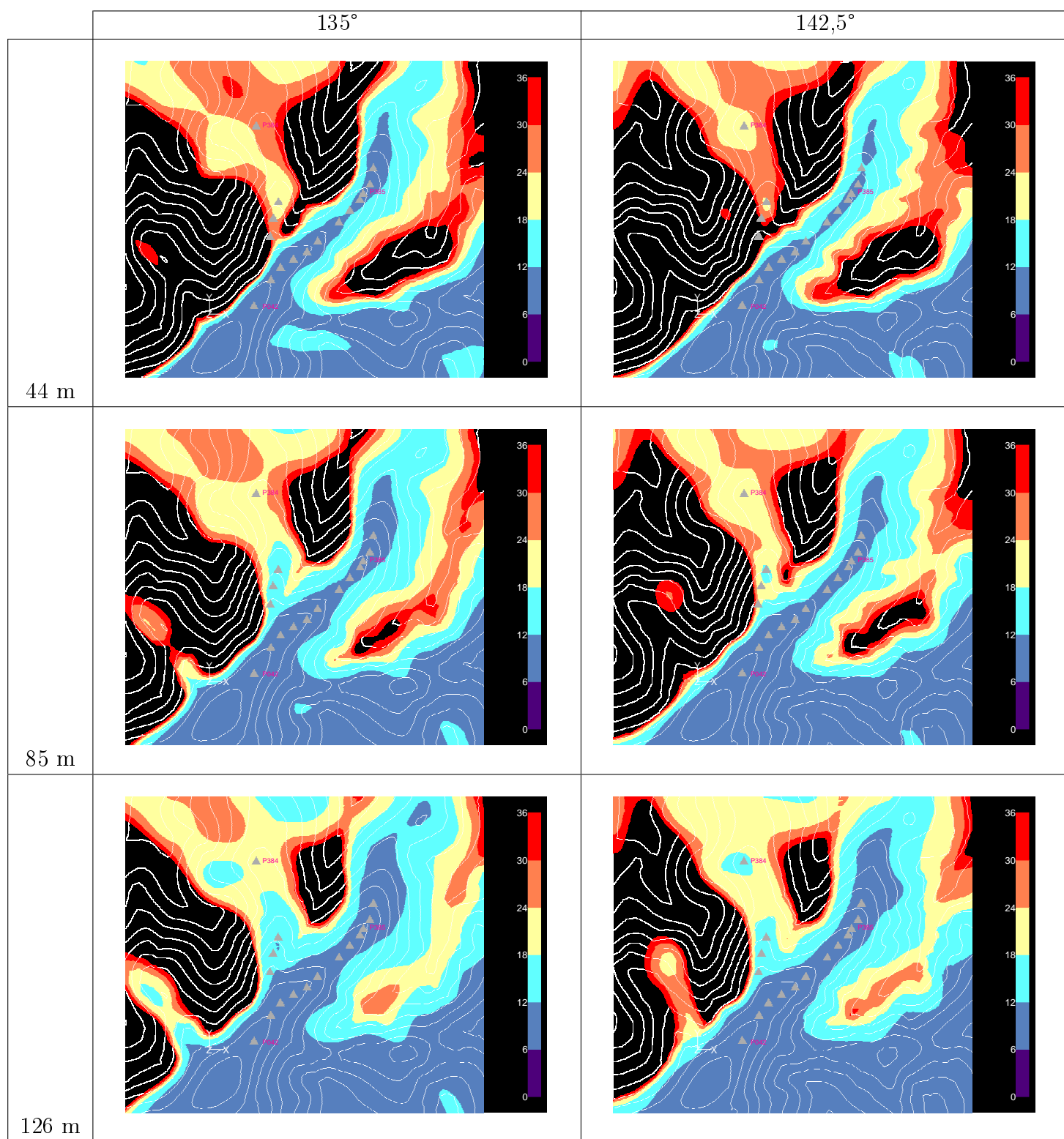


Figura B.15: Campos de intensidade turbulenta (%) para as direcções 135° e 142,5°

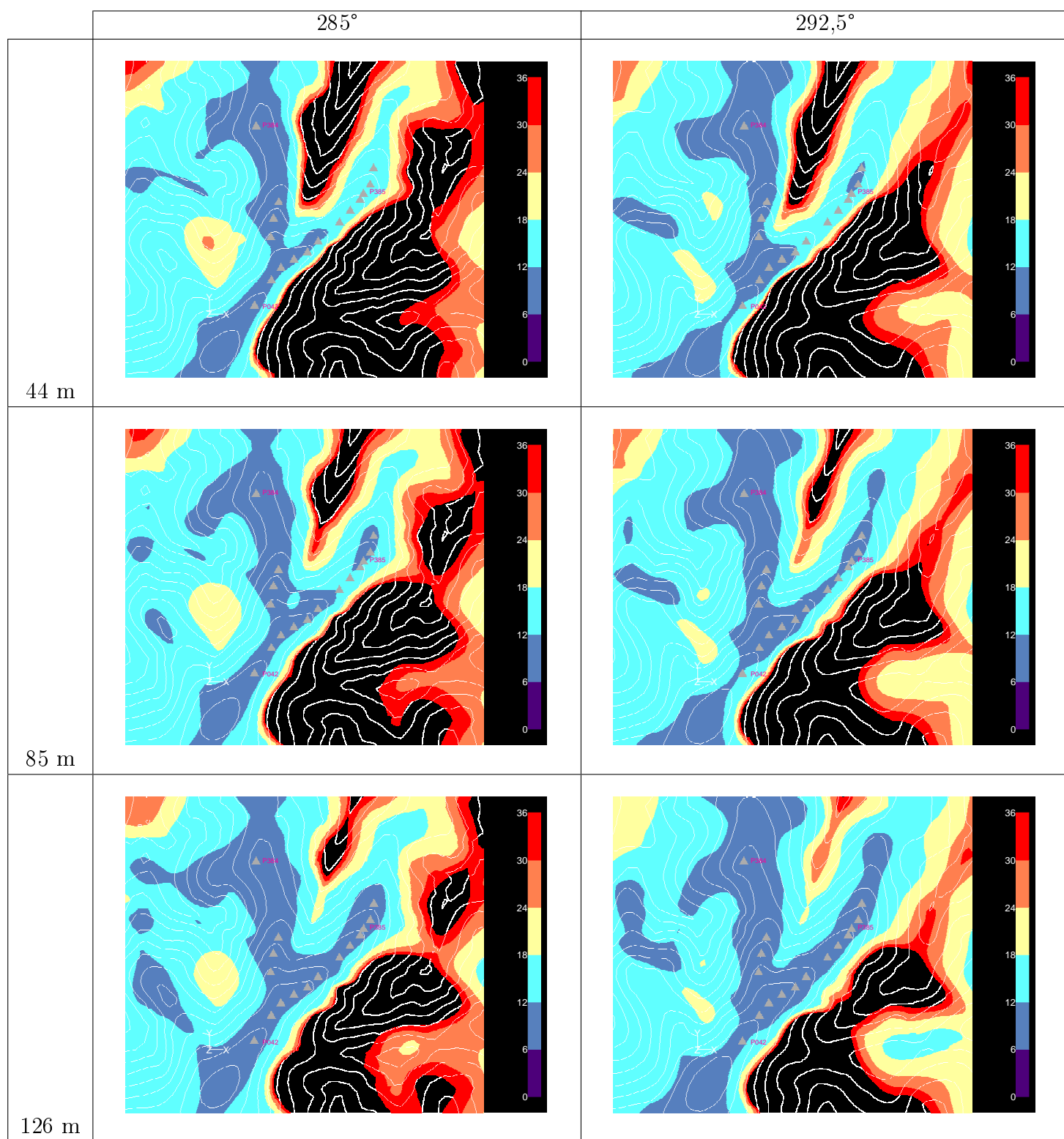


Figura B.16: Campos de intensidade turbulenta (%) para as direcções 285° e 292,5°

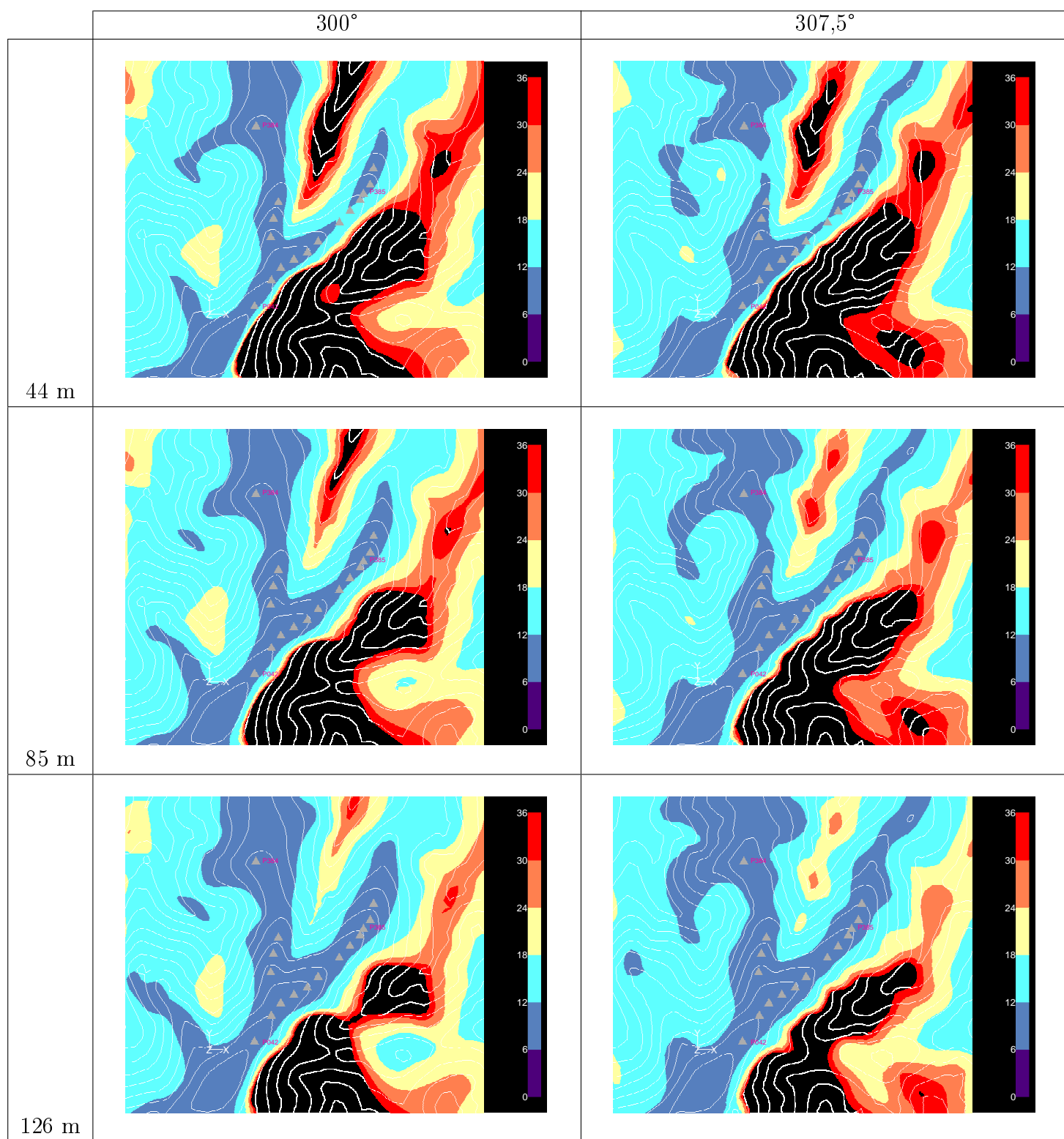


Figura B.17: Campos de intensidade turbulenta (%) para as direcções 300° e 3075°

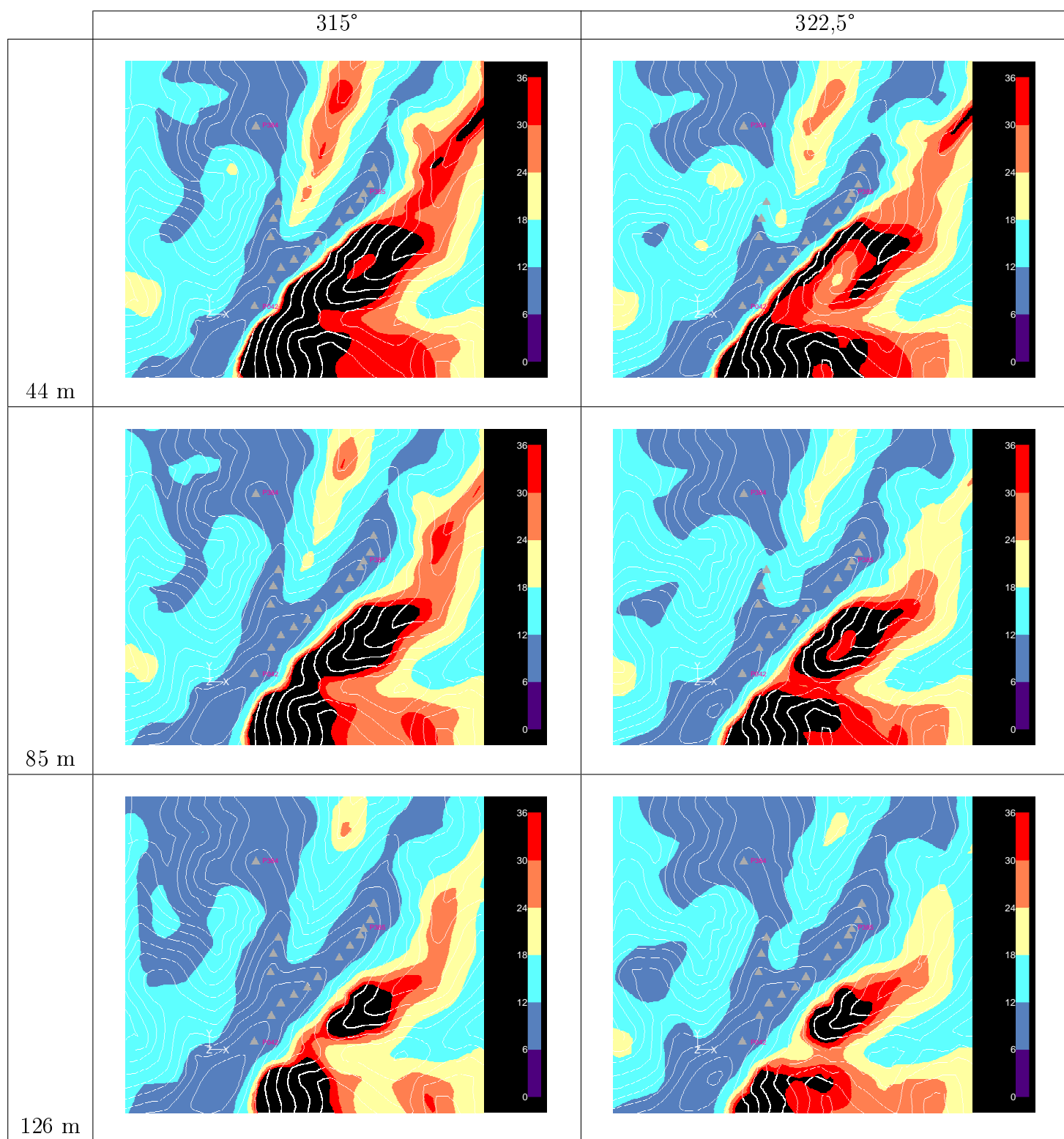


Figura B.18: Campos de intensidade turbulenta (%) para as direcções 315° e 322,5°

Apêndice C

Perfis

Perfis de Velocidade

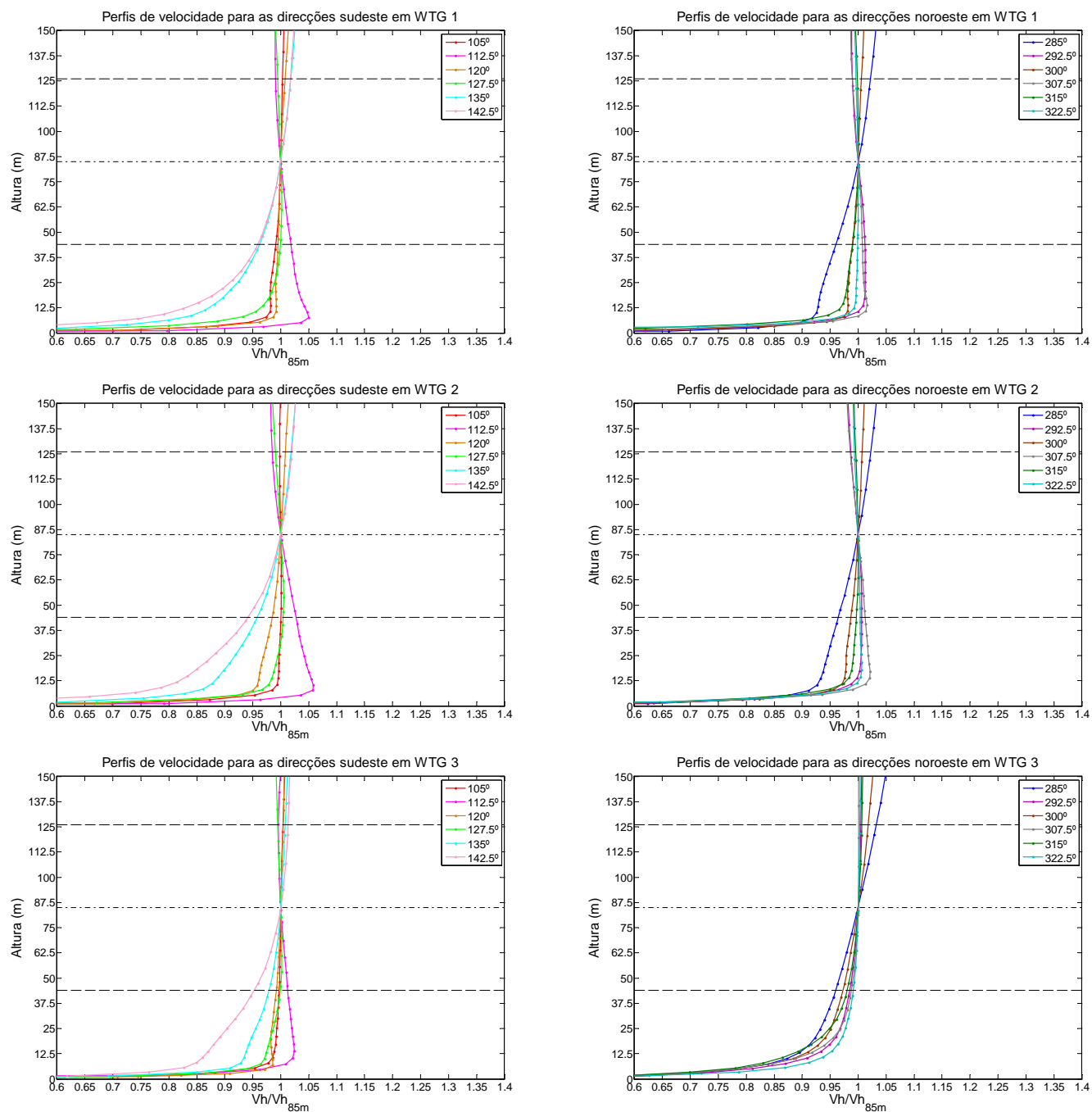


Figura C.1: Perfis de velocidade para os aerogeradores WTG 1, WTG 2 e WTG 3

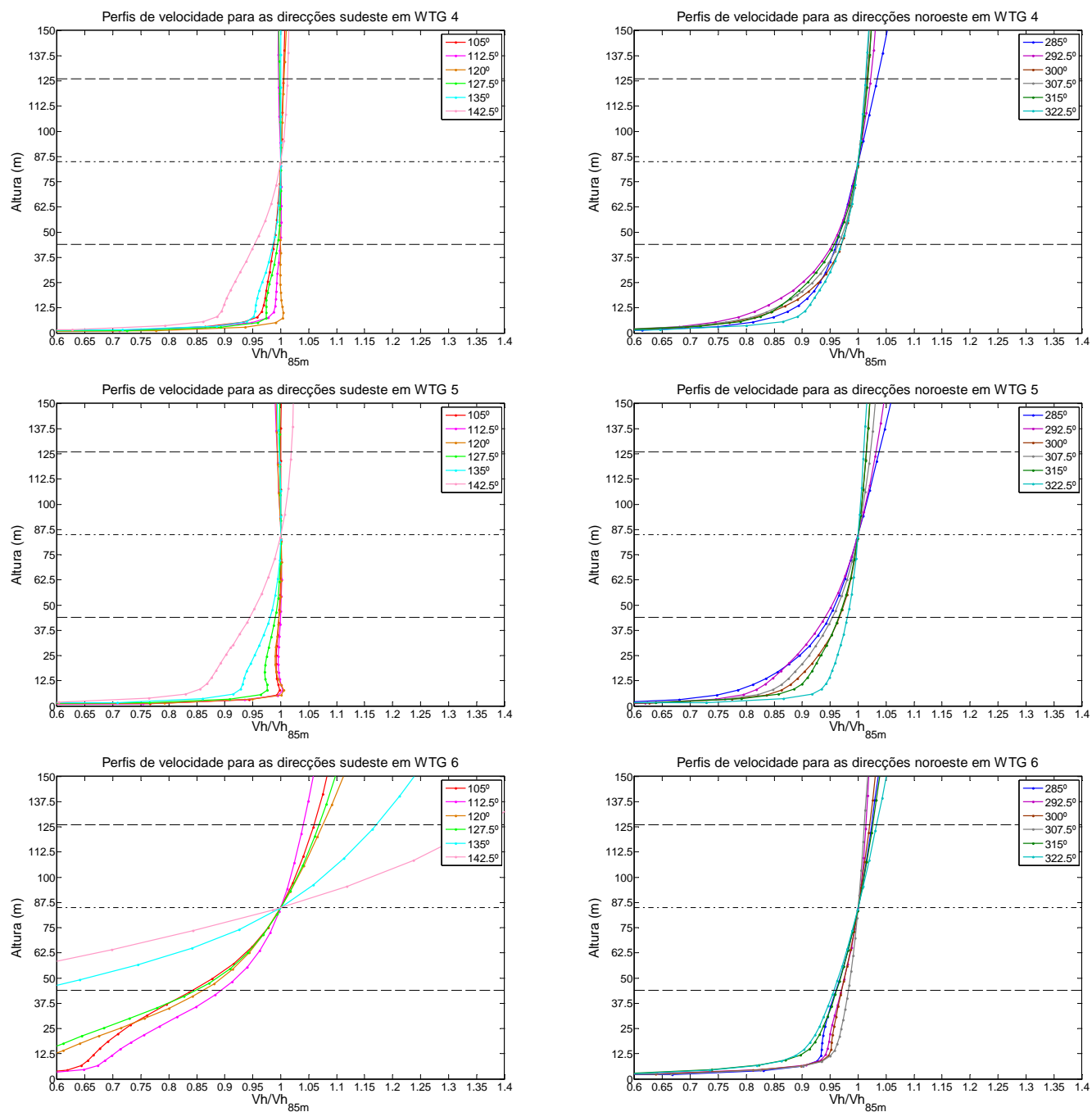


Figura C.2: Perfis de velocidade para os aerogeradores WTG 4, WTG 5 e WTG 6

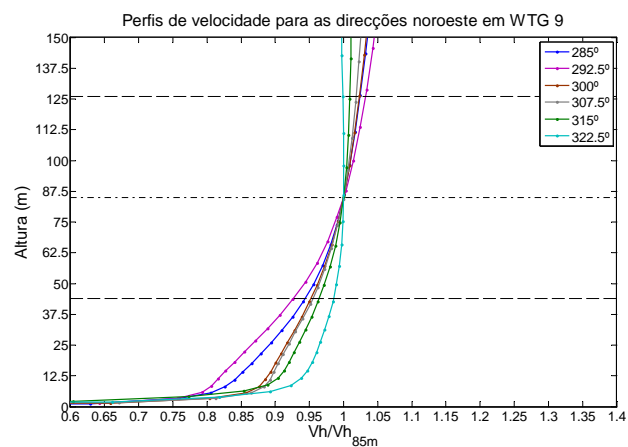
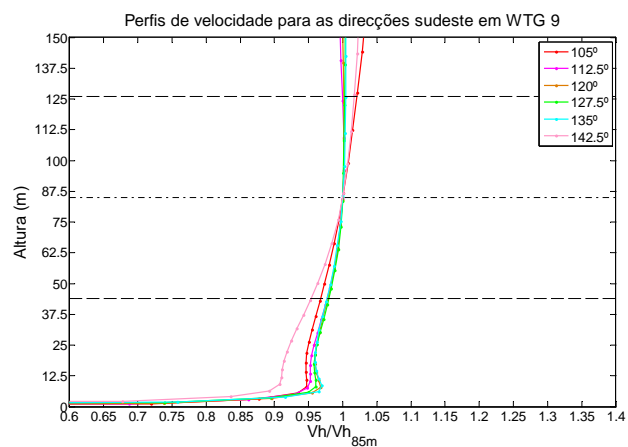
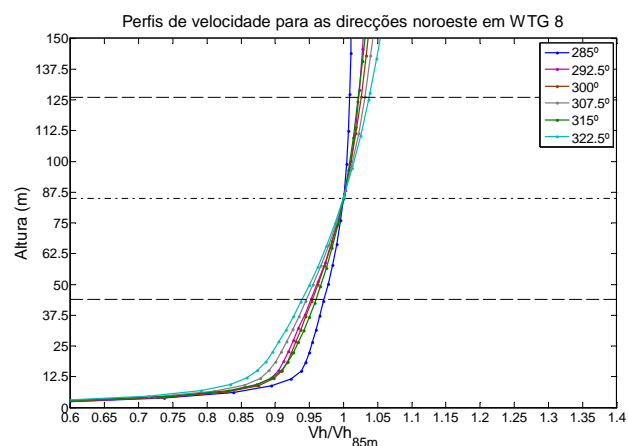
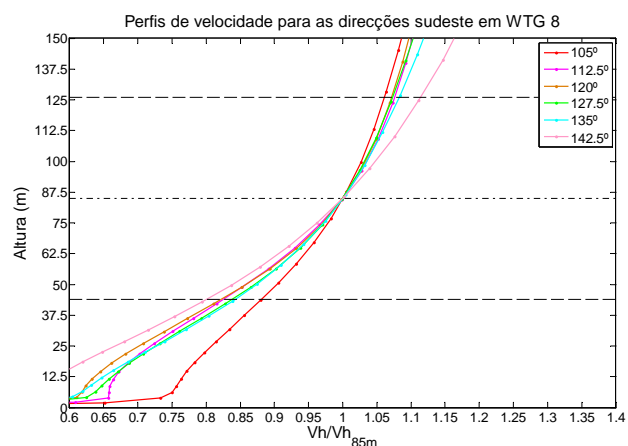
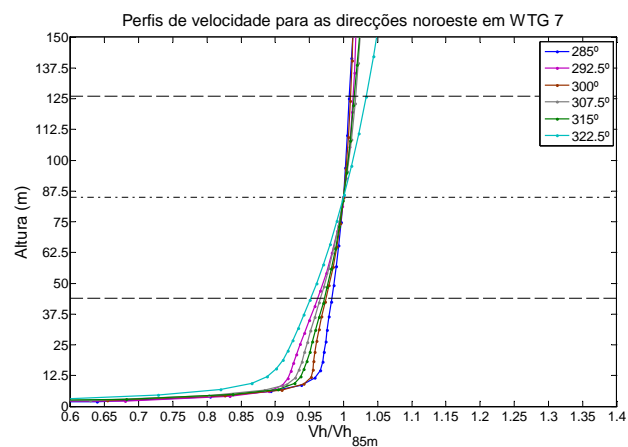
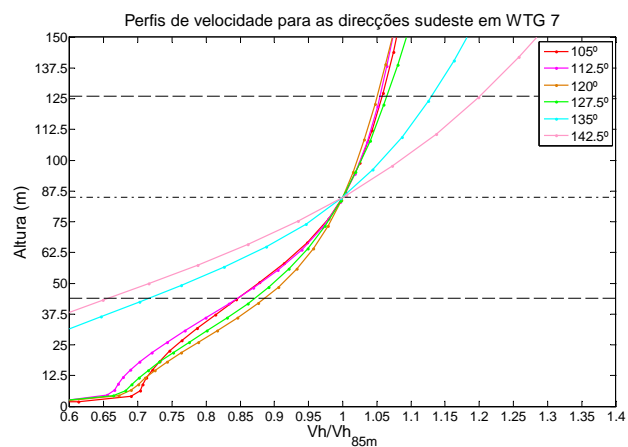


Figura C.3: Perfis de velocidade para os aerogeradores WTG 7, WTG 8 e WTG 9

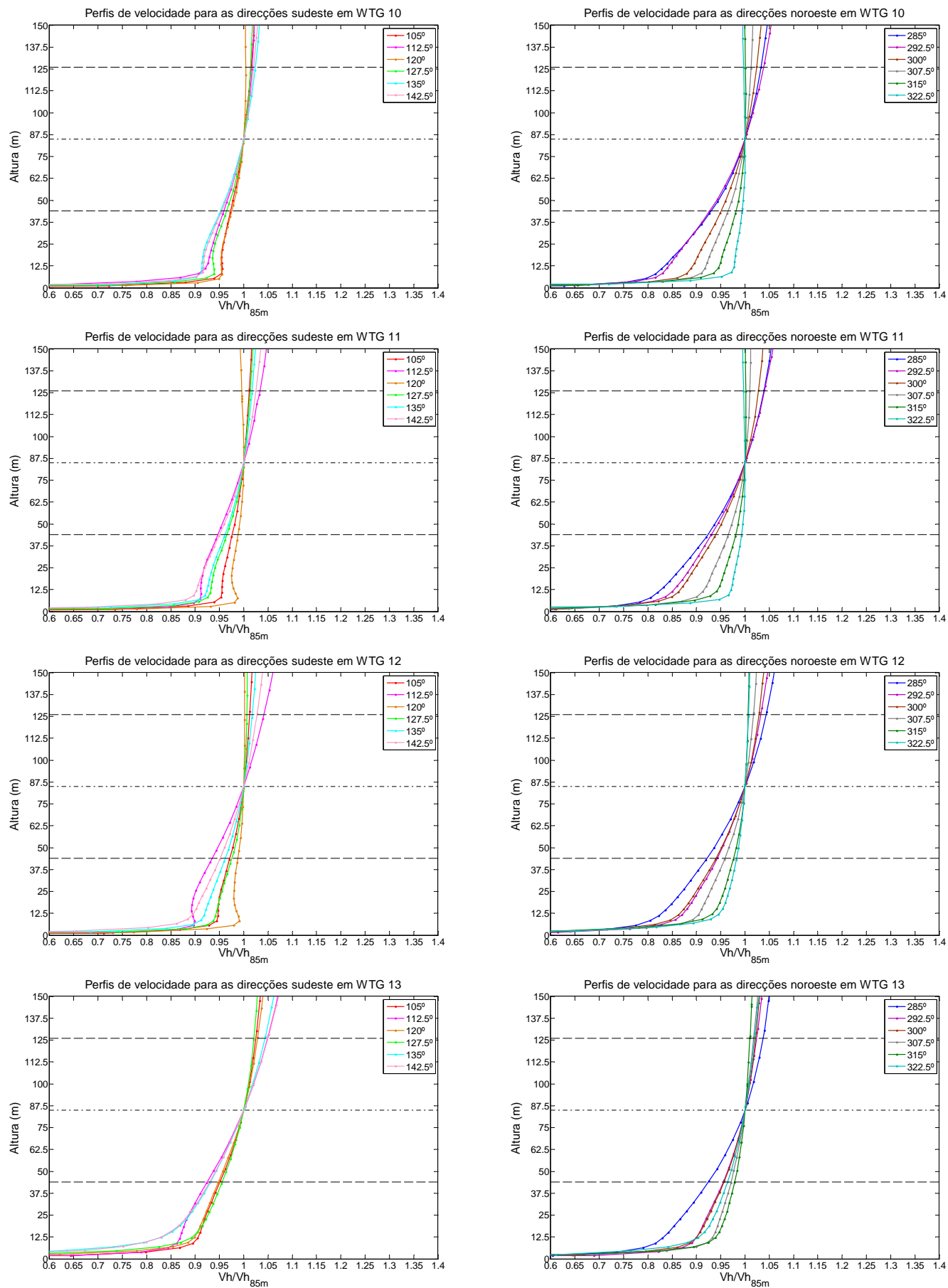


Figura C.4: Perfis de velocidade para os aerogeradores WTG 10, WTG 11, WTG 12 e WTG 13

Perfis de inclinação vertical

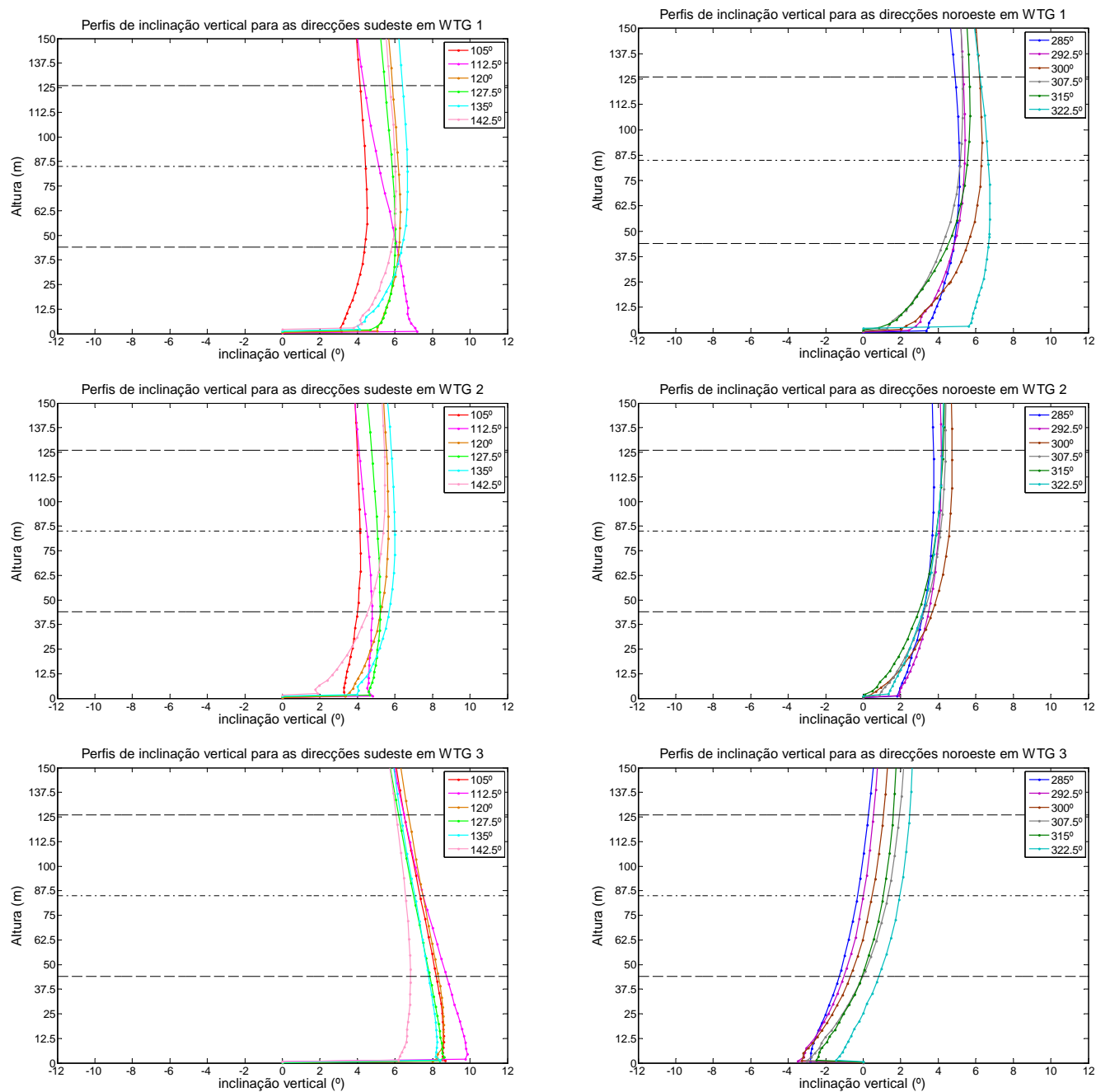


Figura C.5: Perfis de inclinação vertical para os aerogeradores WTG 1, WTG 2 e WTG 3

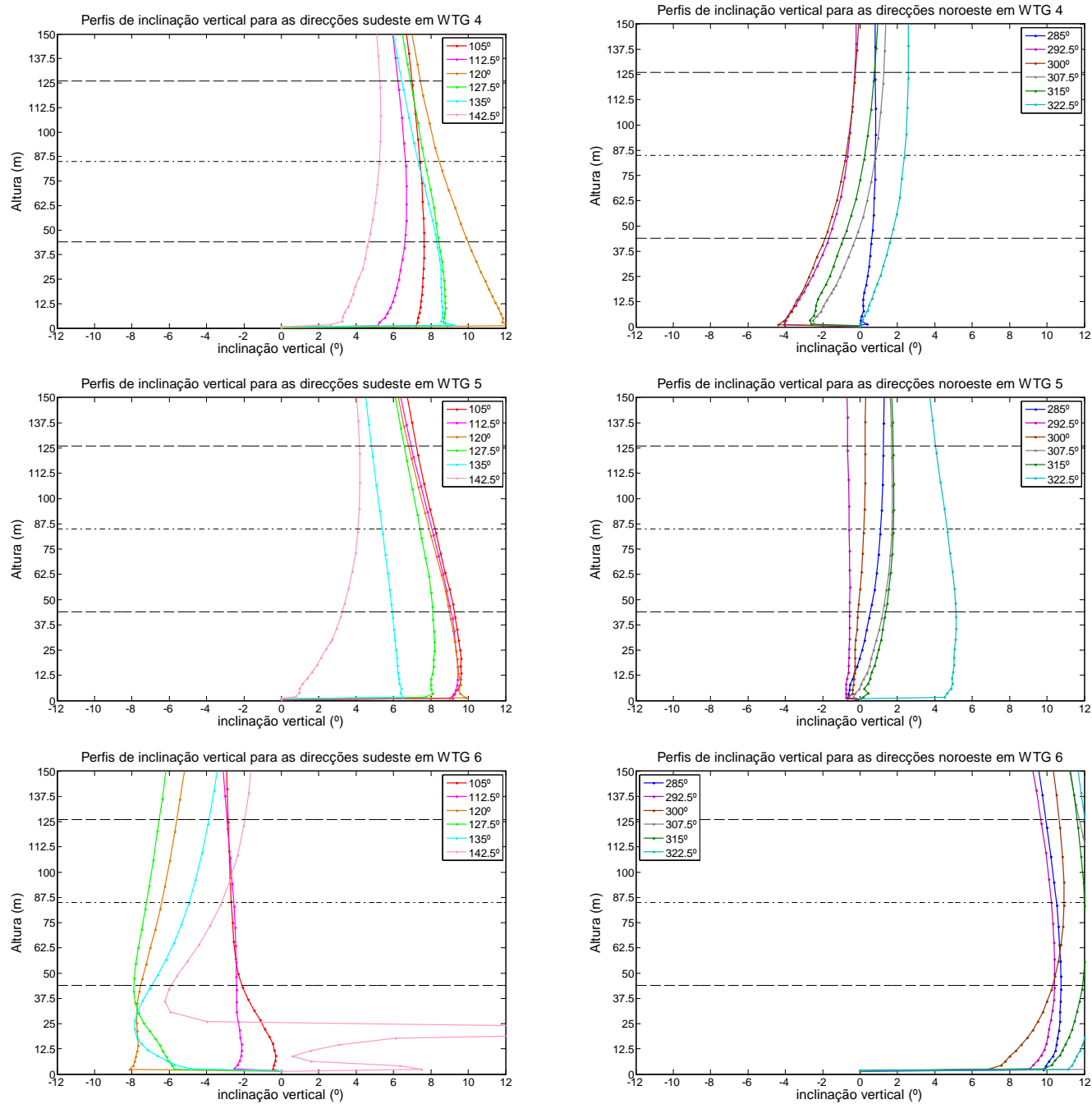


Figura C.6: Perfis de inclinação vertical para os aerogeradores WTG 4, WTG 5 e WTG 6

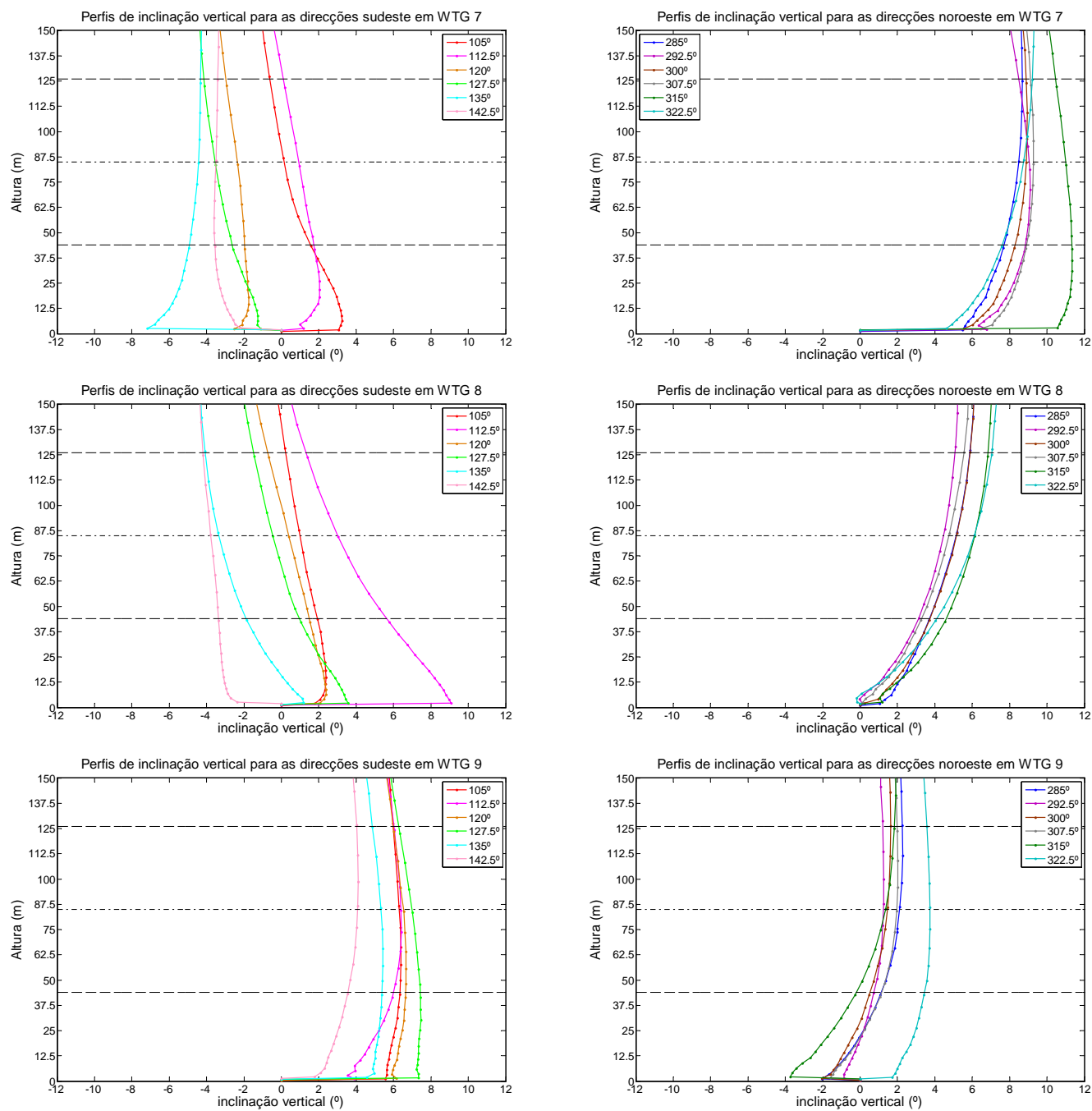


Figura C.7: Perfis de inclinação vertical para os aerogeradores WTG 7, WTG 8 e WTG 9

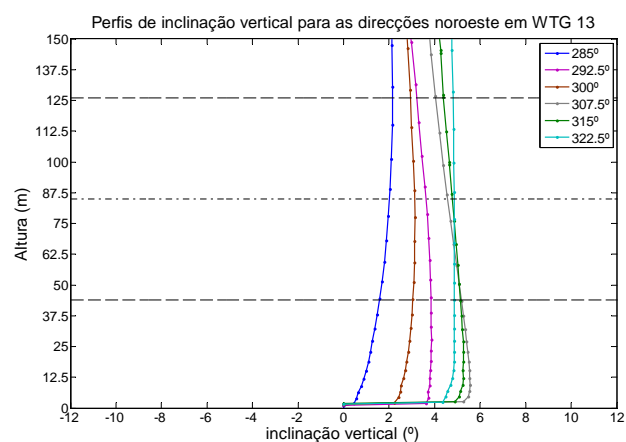
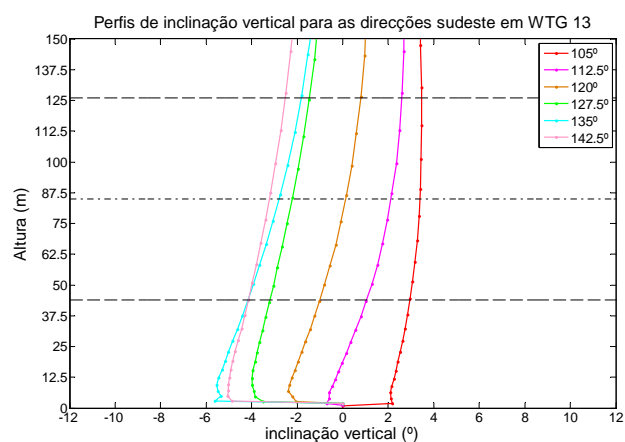
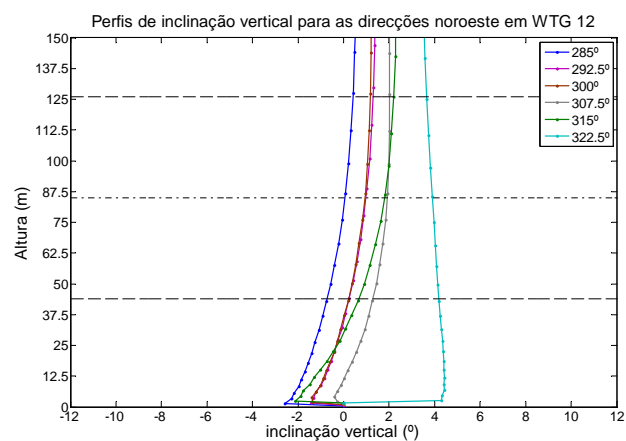
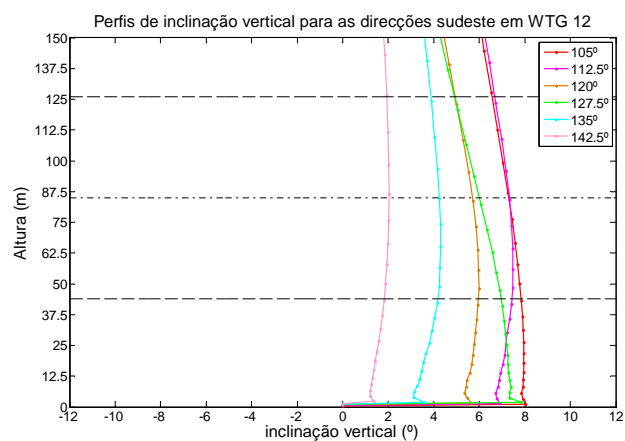
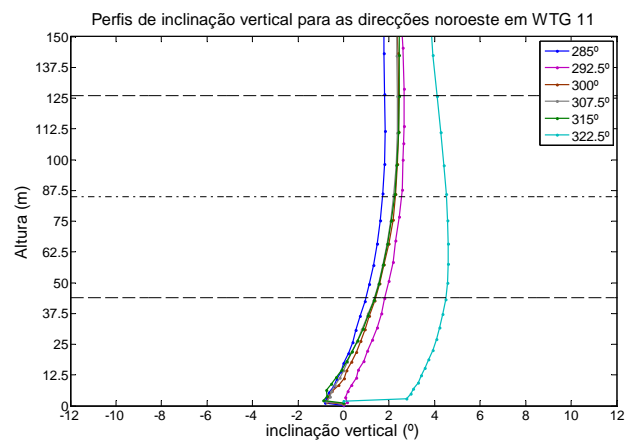
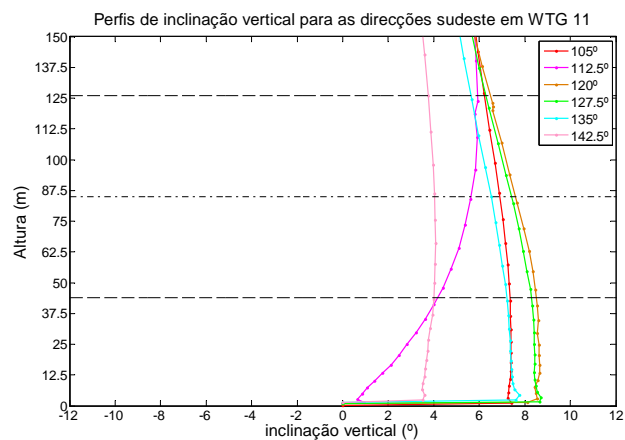
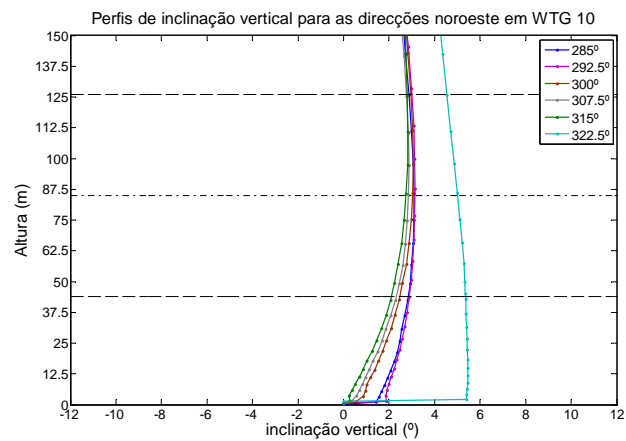
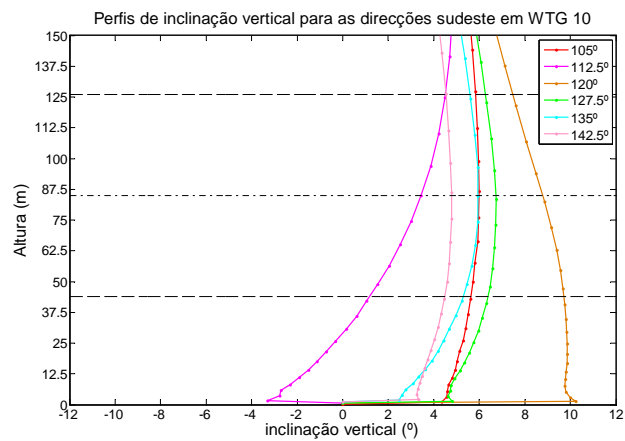


Figura C.8: Perfis de inclinação vertical para os aerogeradores WTG 10, WTG 11, WTG 12 e WTG 13

Perfis de intensidade turbulenta

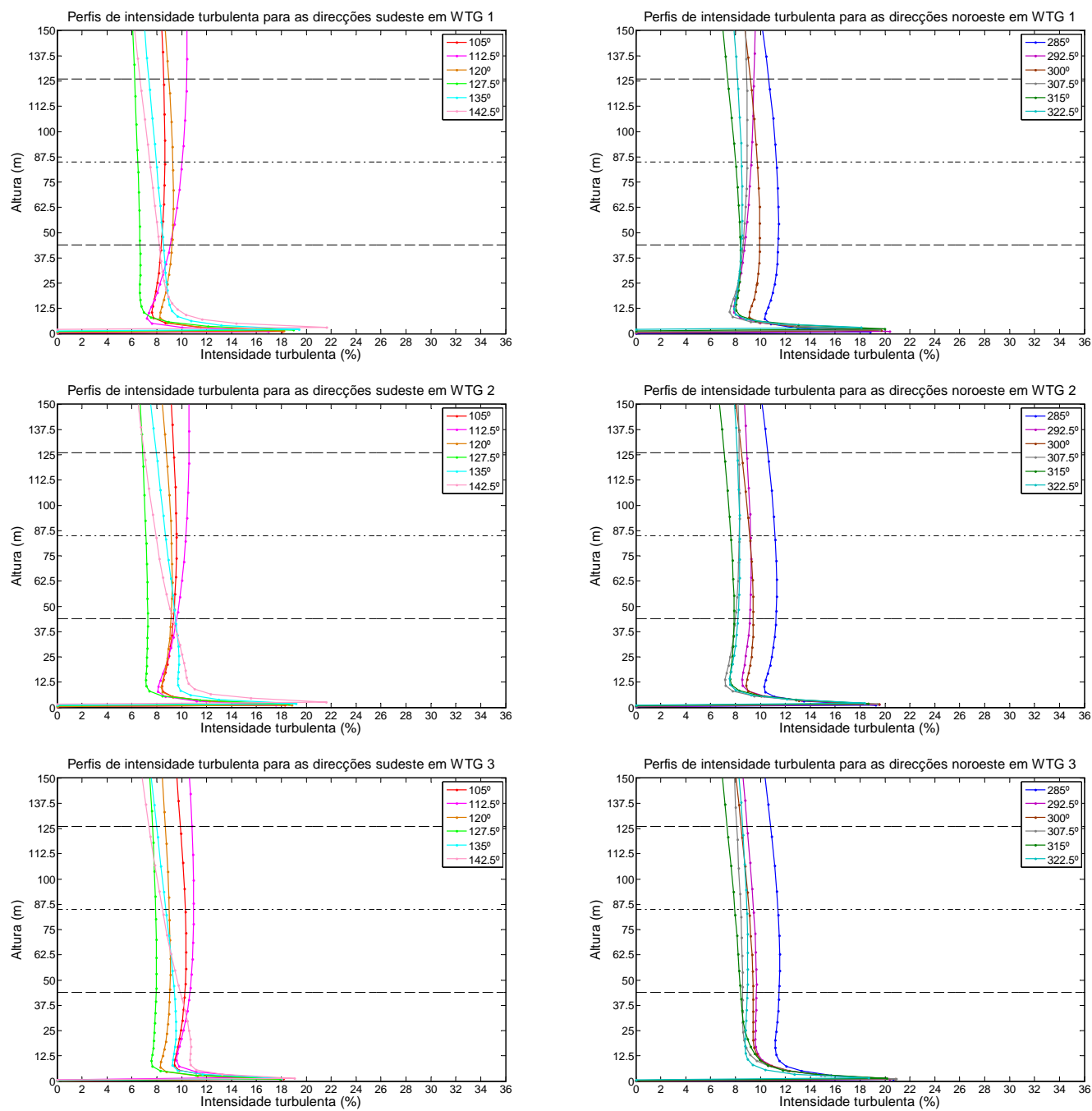


Figura C.9: Perfis de intensidade turbulenta para os aerogeradores WTG 1, WTG 2 e WTG 3

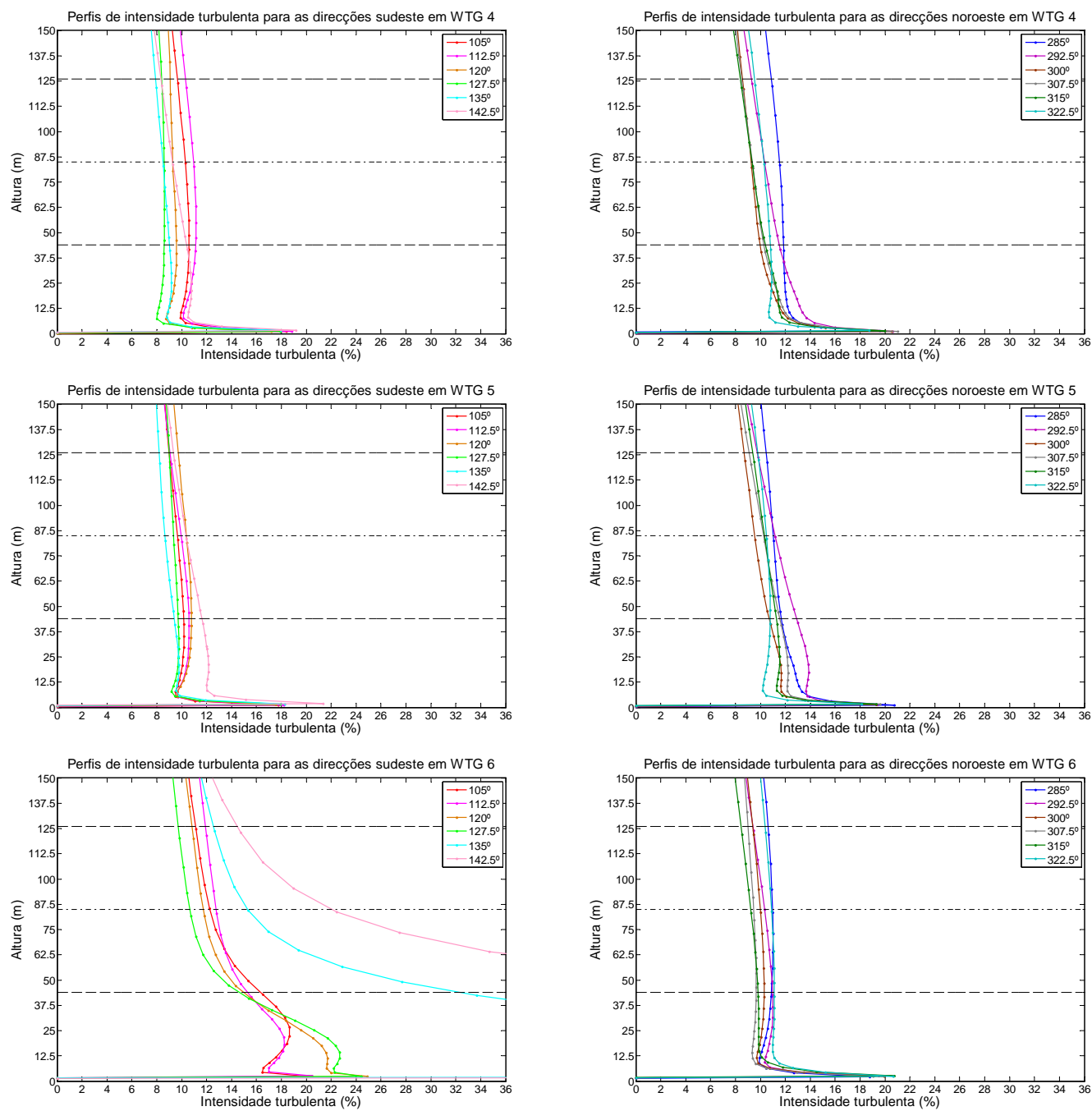


Figura C.10: Perfis de intensidade turbulenta para os aerogeradores WTG 4, WTG 5 e WTG 6

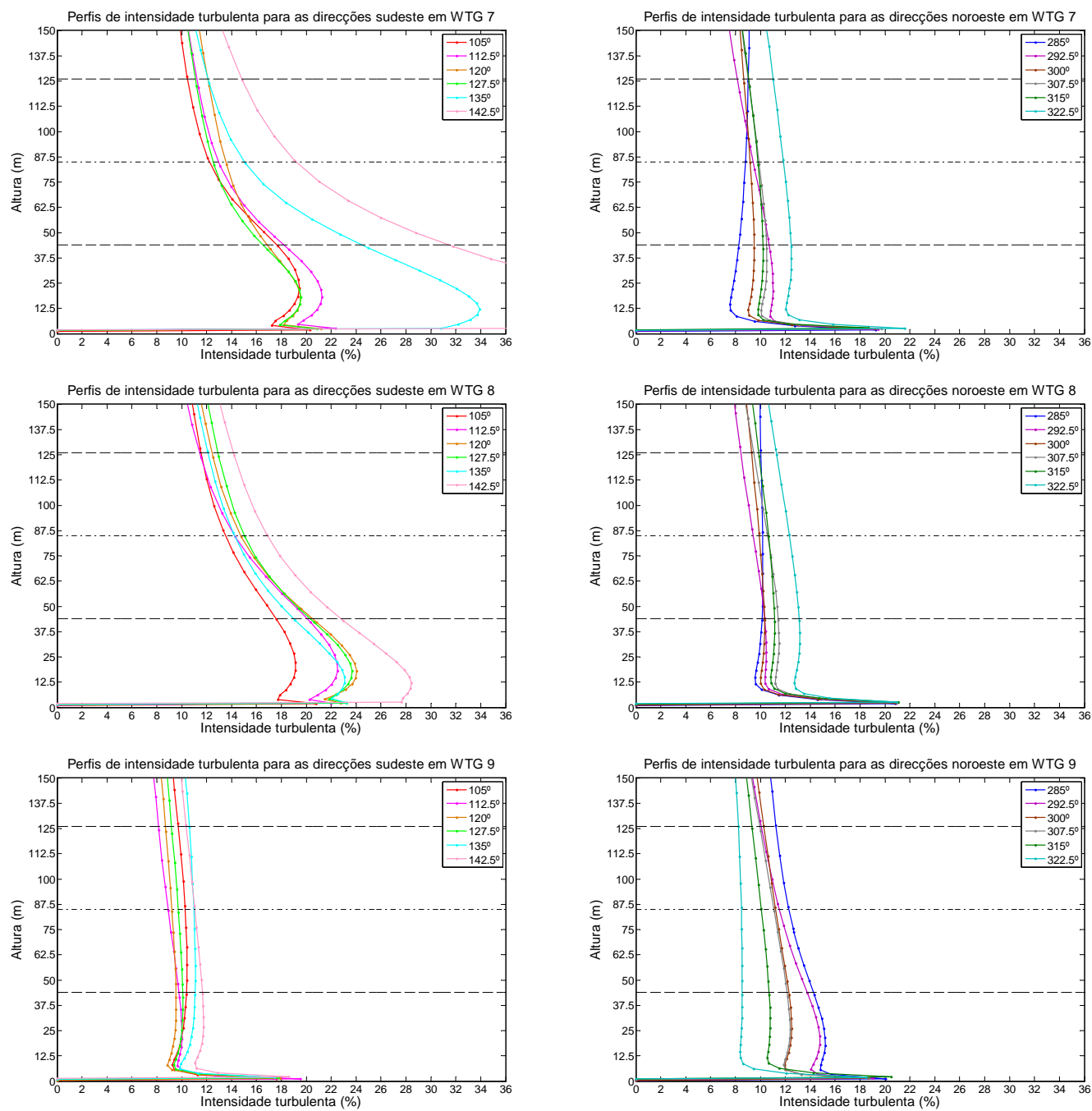


Figura C.11: Perfis de intensidade turbulenta para os aerogeradores WTG 7, WTG 8 e WTG 9

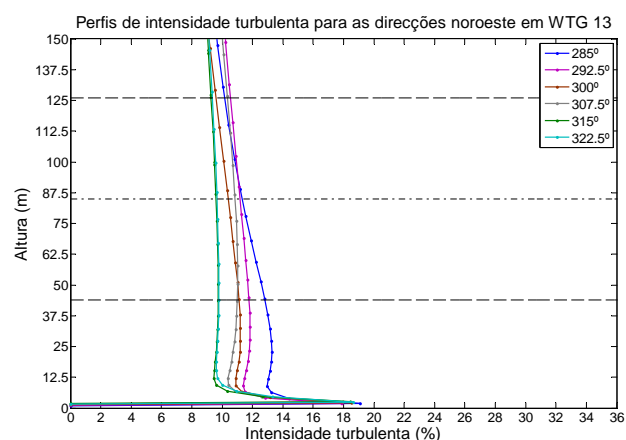
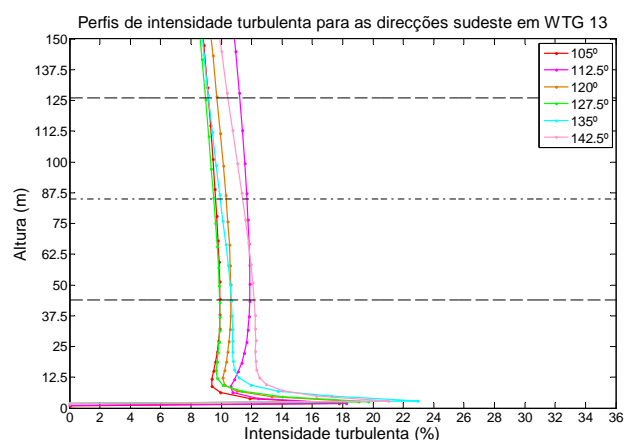
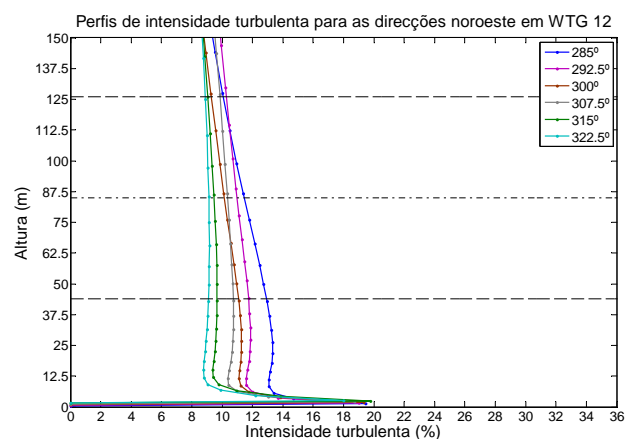
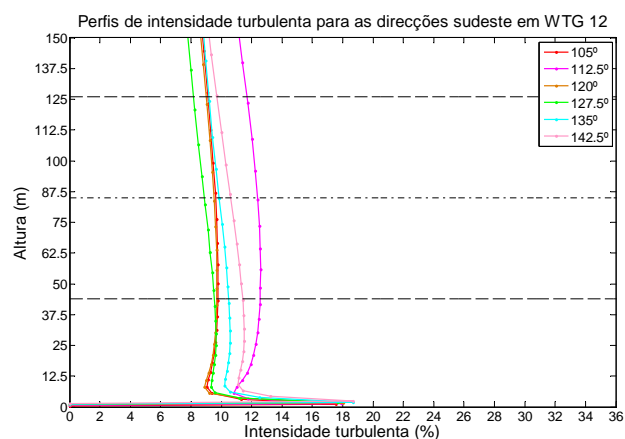
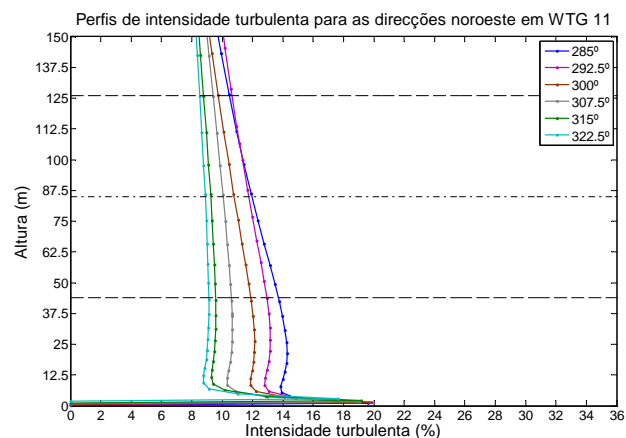
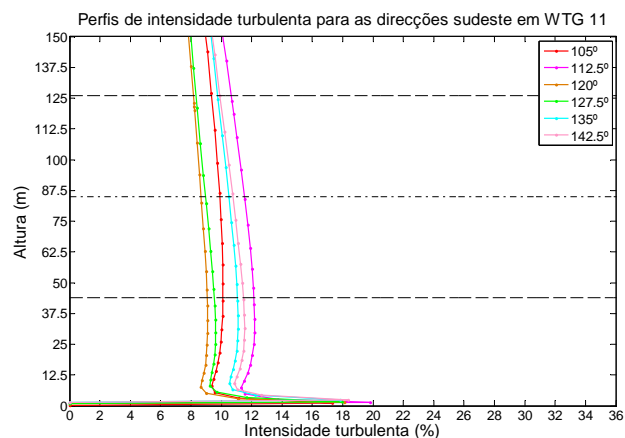
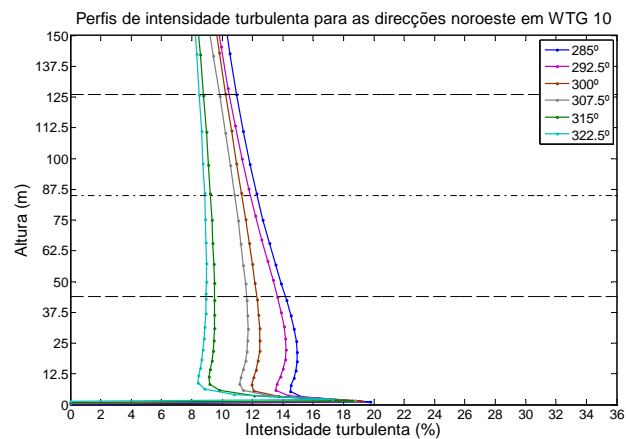
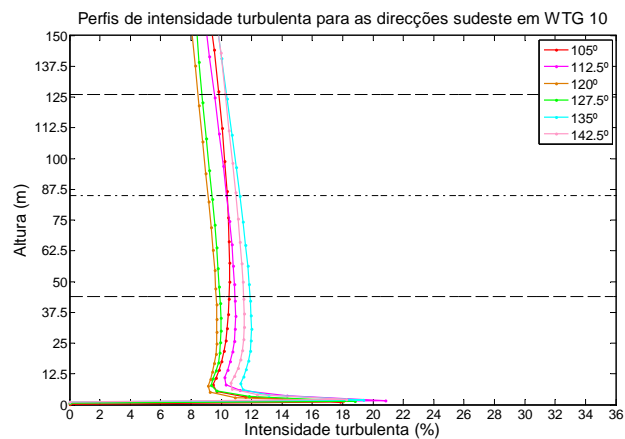


Figura C.12: Perfis de intensidade turbulenta para os aerogeradores WTG 10, WTG 11, WTG 12 e WTG 13

Perfis de *shear factor*

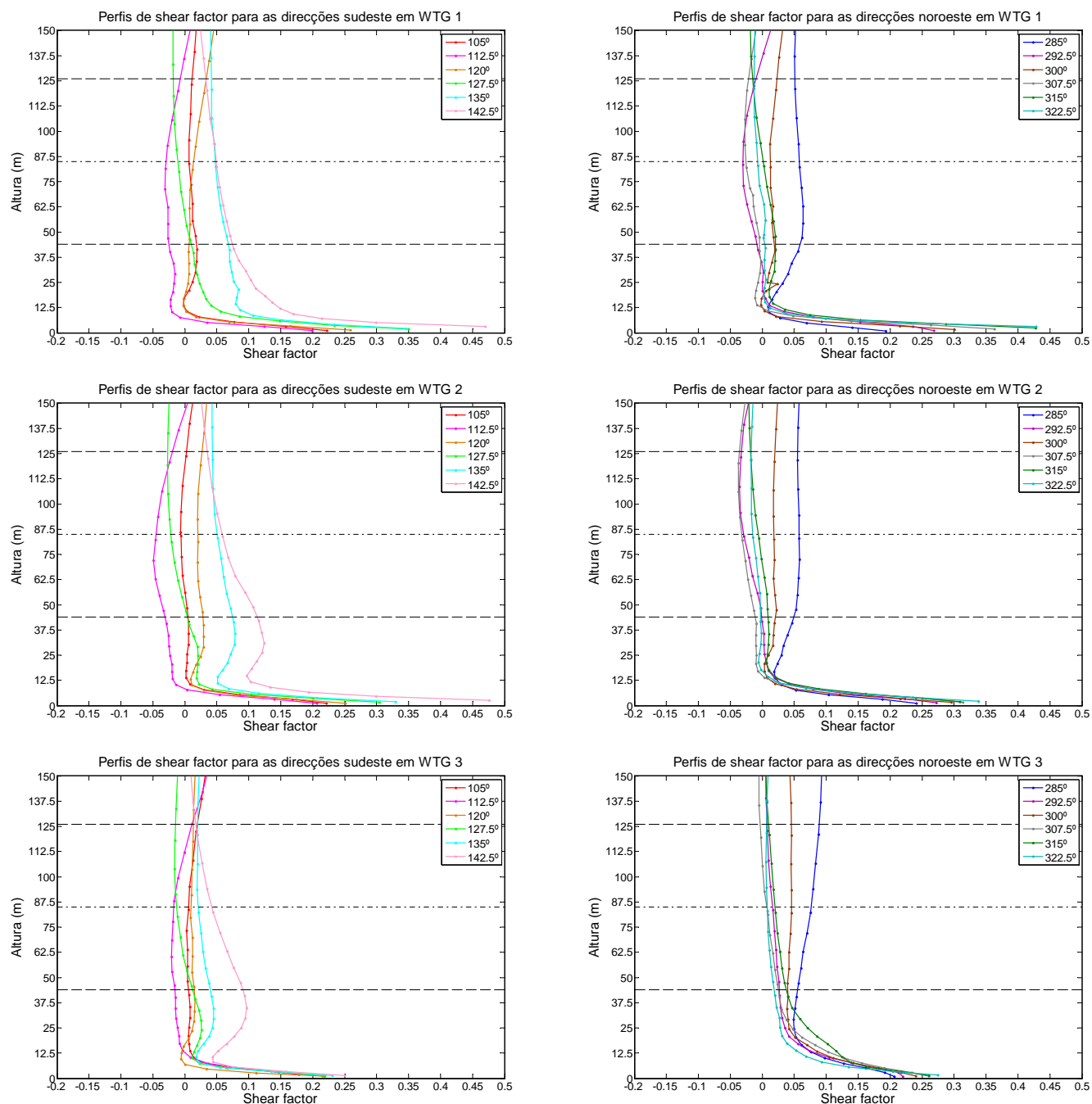


Figura C.13: Perfis de *shear factor* para os aerogeradores WTG 1, WTG 2 e WTG 3

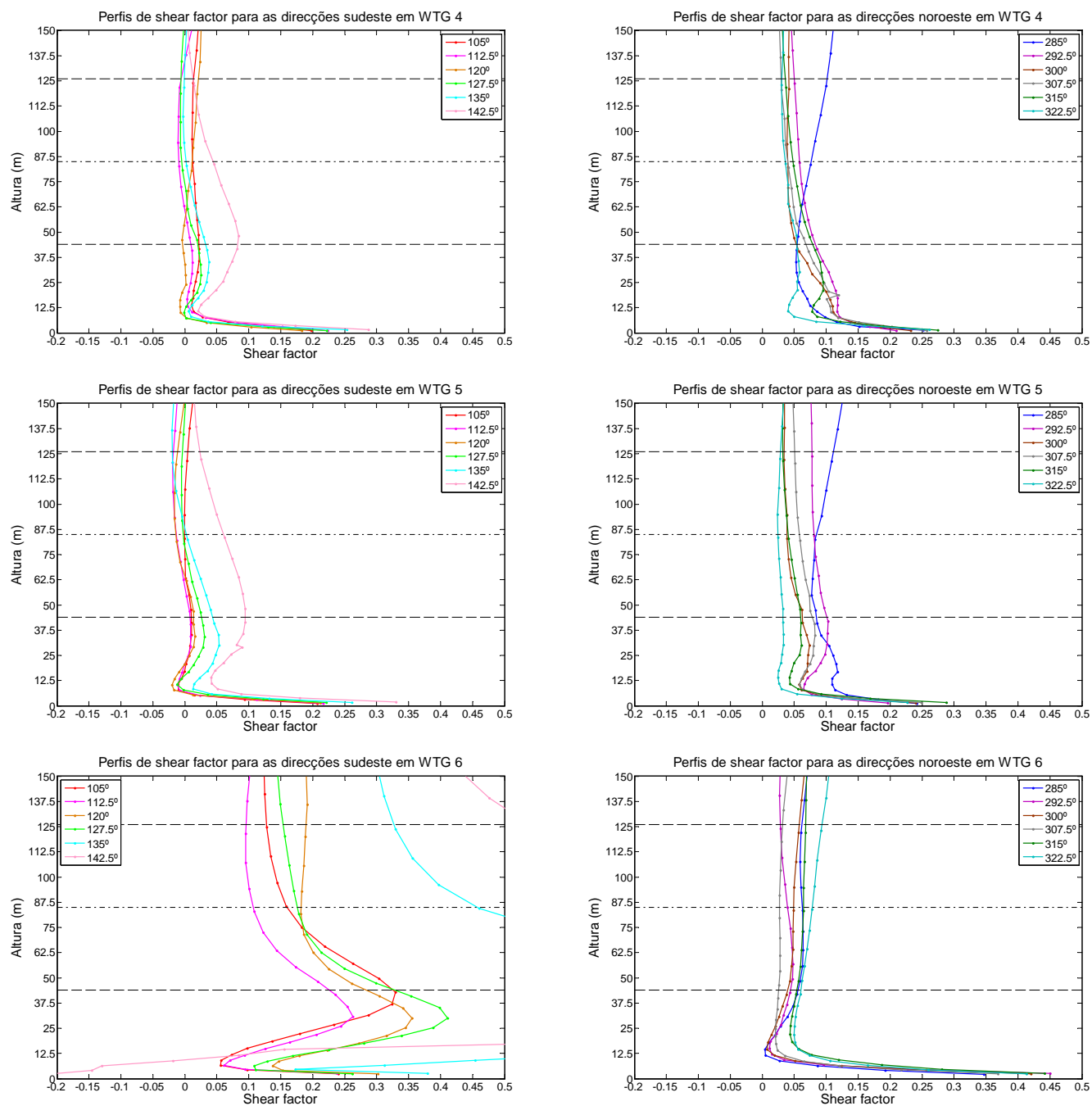


Figura C.14: Perfis de *shear factor* para os aerogeradores WTG 4, WTG 5 e WTG 6

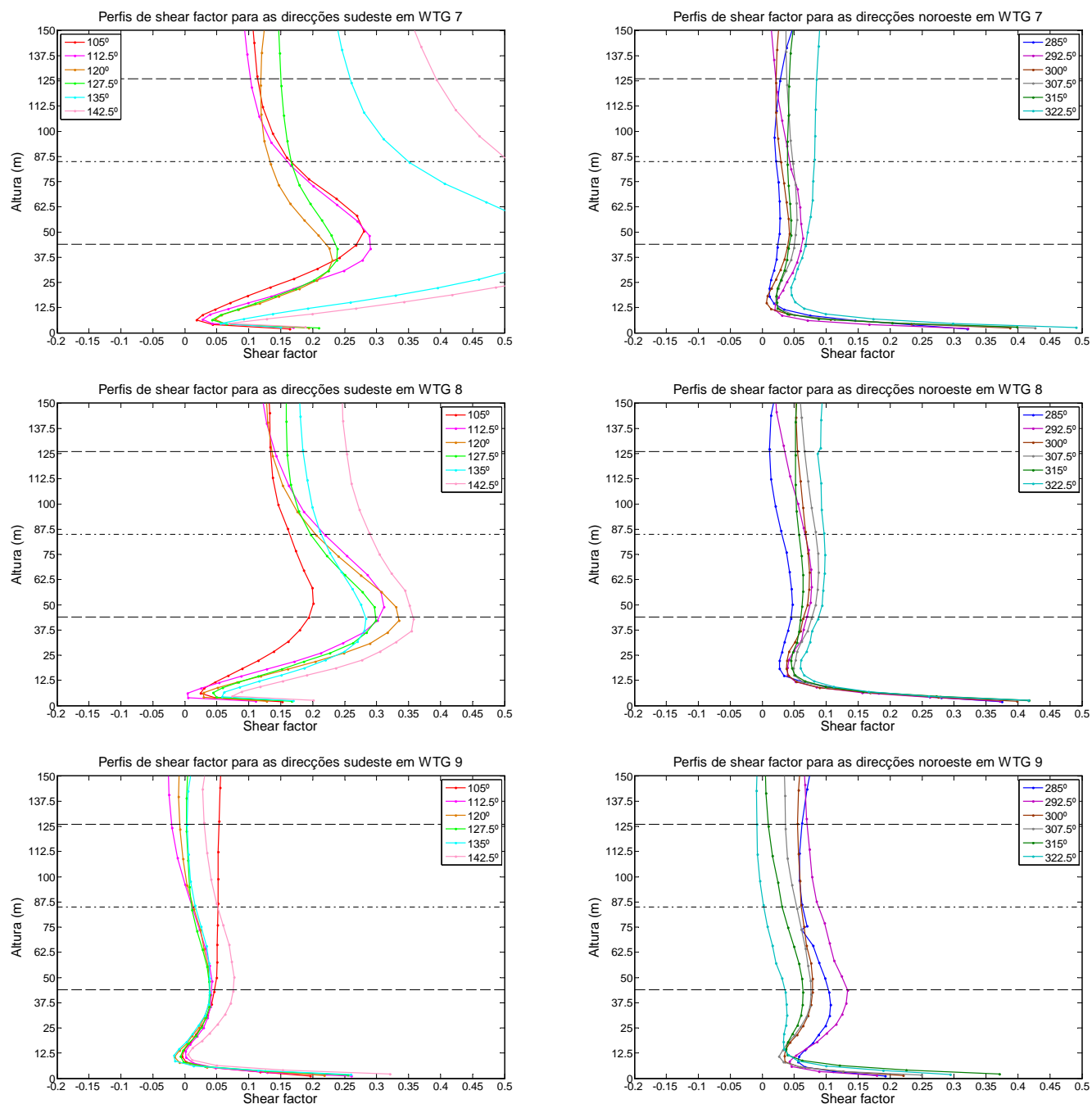


Figura C.15: Perfis shear de factor para os aerogeradores WTG 7, WTG 8 e WTG 9

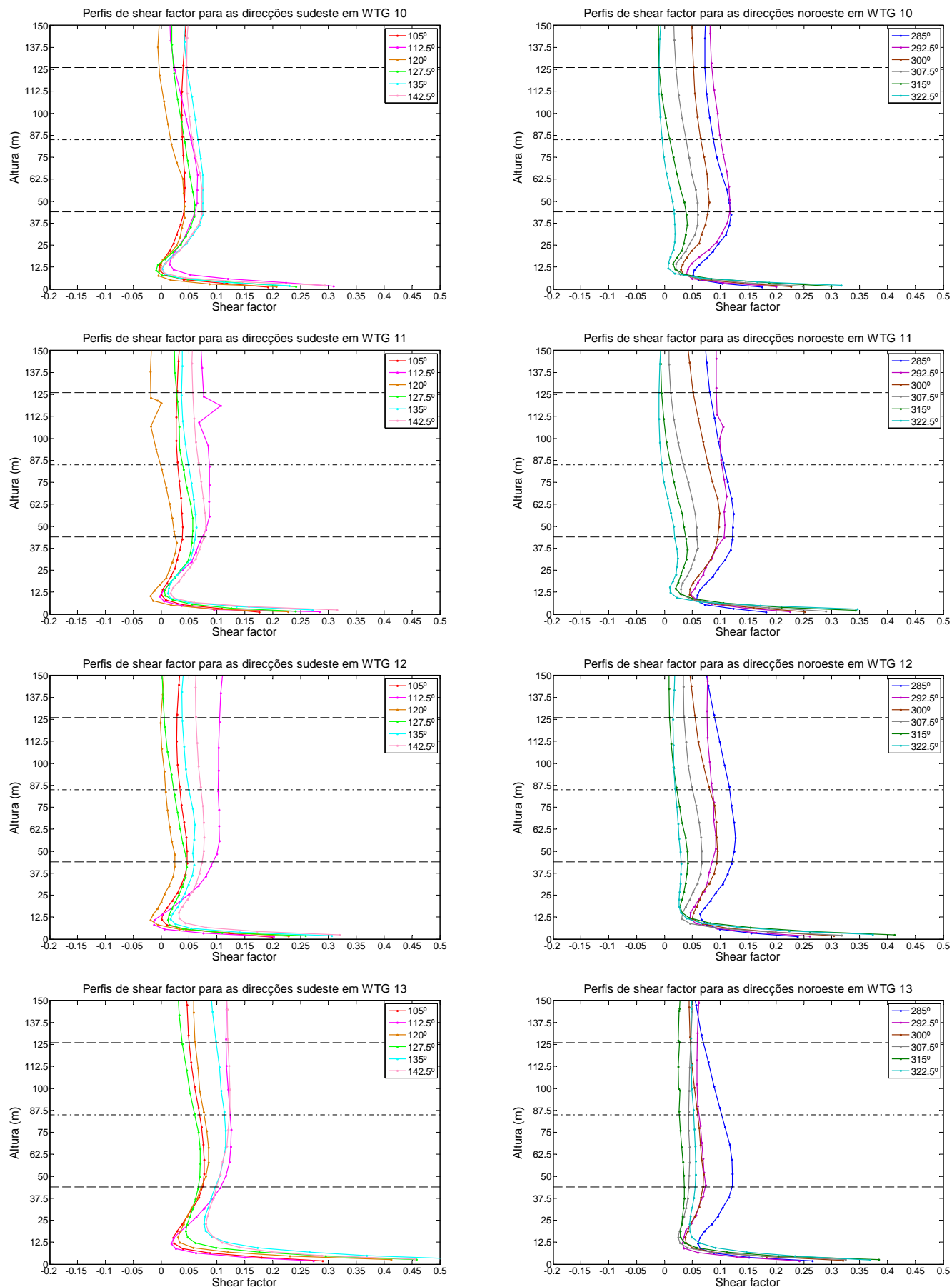


Figura C.16: Perfis de *shear factor* para os aerogeradores WTG 10, WTG 11, WTG 12 e WTG 13

Apêndice D

Valores pontuais para cada aerogerador

Tabela D.1: Valores pontuais para o aerogerador WTG 1

h=44m	Velocidade horizontal (m/s)	Inclinação vertical (°)	Intensidade turbulenta (%)	Shear factor
105°	7,8	4,4	8,4	0,02
112.5°	7,5	6,1	9,1	-0,02
120°	7,7	6,2	9,2	0,01
127.5°	8,8	6,0	6,7	0,01
135°	7,7	6,4	8,5	0,07
142.5°	8,3	5,8	8,2	0,07
285°	7,6	4,8	11,4	0,06
292.5	7,5	4,9	8,7	-0,01
300°	8,2	5,6	9,9	0,02
307.5°	8,5	4,3	8,6	0,00
315°	9,4	4,5	8,4	0,02
322.5°	8,6	6,7	8,5	0,00
h=85m	Velocidade horizontal (m/s)	Inclinação vertical (°)	Intensidade turbulenta (%)	Shear factor
105°	7,9	4,4	8,6	0,01
112.5°	7,4	5,1	10,0	-0,03
120°	7,8	6,2	9,3	0,01
127.5°	8,8	5,9	6,5	-0,01
135°	8,0	6,7	8,0	0,05
142.5°	8,6	6,0	7,4	0,05
285°	7,9	5,1	11,3	0,06
292.5	7,4	5,4	9,3	-0,03
300°	8,3	6,3	9,8	0,01
307.5°	8,4	5,2	8,9	-0,03
315°	9,5	5,6	8,0	0,00
322.5°	8,6	6,7	8,5	-0,01
h=126m	Velocidade horizontal (m/s)	Inclinação vertical (°)	Intensidade turbulenta (%)	Shear factor
105°	7,9	4,1	8,6	0,01
112.5°	7,3	4,4	10,4	-0,01
120°	7,8	5,9	9,0	0,03
127.5°	8,8	5,5	6,2	-0,02
135°	8,2	6,4	7,4	0,04
142.5°	8,8	5,7	6,7	0,03
285°	8,1	4,9	10,7	0,05
292.5	7,3	5,3	9,5	-0,01
300°	8,4	6,2	9,2	0,02
307.5°	8,3	5,3	8,9	-0,02
315°	9,4	5,7	7,4	-0,01
322.5°	8,6	6,2	8,1	-0,01

Tabela D.2: Valores pontuais para o aerogerador WTG 2

h=44m	Velocidade horizontal (m/s)	Inclinação vertical (°)	Intensidade turbulenta (%)	Shear factor
105°	7,8	4,0	9,3	0,00
112.5°	7,7	4,8	9,6	-0,03
120°	7,8	5,3	9,1	0,03
127.5°	8,9	5,2	7,3	0,00
135°	7,6	5,7	9,5	0,07
142.5°	8,0	4,6	9,3	0,11
285°	7,5	3,2	11,2	0,05
292.5	7,9	3,5	9,1	0,00
300°	8,4	3,7	9,4	0,02
307.5°	8,7	3,2	8,0	-0,01
315°	9,4	2,9	7,9	0,01
322.5°	8,5	3,2	8,2	0,00
h=85m	Velocidade horizontal (m/s)	Inclinação vertical (°)	Intensidade turbulenta (%)	Shear factor
105°	7,8	4,1	9,6	-0,01
112.5°	7,5	4,5	10,3	-0,05
120°	7,9	5,6	9,2	0,02
127.5°	8,8	5,1	7,1	-0,02
135°	7,9	6,0	8,7	0,05
142.5°	8,5	5,4	7,9	0,06
285°	7,8	3,7	11,2	0,06
292.5	7,8	4,0	9,2	-0,03
300°	8,5	4,6	9,1	0,02
307.5°	8,6	4,1	8,3	-0,03
315°	9,4	3,9	7,6	-0,01
322.5°	8,5	3,9	8,3	-0,01
h=126m	Velocidade horizontal (m/s)	Inclinação vertical (°)	Intensidade turbulenta (%)	Shear factor
105°	7,8	4,0	9,4	0,00
112.5°	7,4	4,1	10,6	-0,02
120°	8,0	5,5	8,8	0,03
127.5°	8,7	4,8	6,9	-0,03
135°	8,1	5,8	8,0	0,04
142.5°	8,7	5,4	7,0	0,03
285°	8,0	3,7	10,6	0,06
292.5	7,7	4,2	8,9	-0,03
300°	8,6	4,7	8,5	0,02
307.5°	8,5	4,4	8,3	-0,04
315°	9,4	4,3	7,1	-0,02
322.5°	8,4	4,2	8,1	-0,02

Tabela D.3: Valores pontuais para o aerogerador WTG 3

h=44m	Velocidade horizontal (m/s)	Inclinação vertical (°)	Intensidade turbulenta (%)	Shear factor
105°	7,6	8,2	10,2	0,01
112.5°	7,4	8,7	10,6	-0,02
120°	7,9	8,3	9,1	0,01
127.5°	8,6	7,9	7,9	0,01
135°	8,0	7,8	9,4	0,04
142.5°	8,2	6,8	9,9	0,09
285°	6,9	-1,3	11,5	0,06
292.5	7,9	-1,0	9,7	0,03
300°	8,1	-0,7	9,4	0,04
307.5°	8,4	0,0	8,6	0,03
315°	8,8	-0,1	8,4	0,04
322.5°	8,0	0,8	9,0	0,02
h=85m	Velocidade horizontal (m/s)	Inclinação vertical (°)	Intensidade turbulenta (%)	Shear factor
105°	7,6	7,3	10,3	0,01
112.5°	7,4	7,5	11,0	-0,02
120°	8,0	7,5	9,0	0,01
127.5°	8,6	7,0	7,9	-0,01
135°	8,1	7,1	8,7	0,02
142.5°	8,6	6,6	8,4	0,04
285°	7,2	-0,3	11,4	0,08
292.5	8,0	0,0	9,5	0,02
300°	8,3	0,5	9,1	0,05
307.5°	8,5	1,3	8,4	0,01
315°	9,0	1,1	7,9	0,02
322.5°	8,1	1,9	8,9	0,01
h=126m	Velocidade horizontal (m/s)	Inclinação vertical (°)	Intensidade turbulenta (%)	Shear factor
105°	7,7	6,5	9,9	0,02
112.5°	7,3	6,5	10,8	0,01
120°	8,0	6,7	8,7	0,01
127.5°	8,5	6,2	7,7	-0,01
135°	8,2	6,3	8,0	0,02
142.5°	8,7	6,1	7,4	0,02
285°	7,5	0,3	10,8	0,09
292.5	8,1	0,5	8,9	0,01
300°	8,4	1,1	8,5	0,05
307.5°	8,5	1,9	8,1	0,00
315°	9,0	1,6	7,3	0,01
322.5°	8,1	2,5	8,6	0,01

Tabela D.4: Valores pontuais para o aerogerador WTG 4

h=44m	Velocidade horizontal (m/s)	Inclinação vertical (°)	Intensidade turbulenta (%)	Shear factor
105°	7,6	7,6	10,6	0,02
112.5°	7,7	6,6	11,1	0,01
120°	7,6	10,0	9,6	0,00
127.5°	8,2	8,4	8,6	0,02
135°	8,1	8,3	9,0	0,03
142.5°	8,0	4,7	10,4	0,08
285°	6,5	0,6	11,9	0,05
292.5	7,6	-1,7	11,5	0,08
300°	7,9	-1,9	10,0	0,05
307.5°	8,1	-0,2	10,3	0,07
315°	8,1	-0,9	10,4	0,08
322.5°	7,6	1,7	10,8	0,05
h=85m	Velocidade horizontal (m/s)	Inclinação vertical (°)	Intensidade turbulenta (%)	Shear factor
105°	7,7	7,4	10,3	0,01
112.5°	7,7	6,6	11,0	-0,01
120°	7,6	8,4	9,3	0,01
127.5°	8,3	7,7	8,6	0,00
135°	8,2	7,3	8,5	0,00
142.5°	8,4	5,2	9,3	0,04
285°	6,8	0,8	11,5	0,08
292.5	7,9	-0,7	10,3	0,06
300°	8,1	-0,8	9,3	0,04
307.5°	8,4	0,8	9,3	0,04
315°	8,4	0,2	9,3	0,05
322.5°	7,8	2,4	10,3	0,04
h=126m	Velocidade horizontal (m/s)	Inclinação vertical (°)	Intensidade turbulenta (%)	Shear factor
105°	7,7	7,0	9,6	0,01
112.5°	7,6	6,2	10,3	-0,01
120°	7,7	7,4	9,1	0,02
127.5°	8,3	6,9	8,4	-0,01
135°	8,2	6,4	7,9	0,00
142.5°	8,5	5,3	8,3	0,01
285°	7,0	0,8	10,9	0,10
292.5	8,1	-0,3	9,3	0,05
300°	8,2	-0,3	8,6	0,04
307.5°	8,6	1,3	8,5	0,03
315°	8,6	0,8	8,4	0,04
322.5°	7,9	2,6	9,5	0,03

Tabela D.5: Valores pontuais para o aerogerador WTG 5

h=44m	Velocidade horizontal (m/s)	Inclinação vertical (°)	Intensidade turbulenta (%)	Shear factor
105°	7,7	9,3	10,1	0,01
112.5°	8,1	9,1	10,6	0,01
120°	7,7	9,0	10,8	0,01
127.5°	8,0	8,1	9,7	0,03
135°	7,9	5,9	9,4	0,04
142.5°	7,5	3,3	11,6	0,09
285°	6,0	0,6	11,7	0,08
292.5	7,3	-0,6	12,9	0,10
300°	7,9	-0,1	10,7	0,06
307.5°	8,0	1,2	11,5	0,08
315°	7,9	1,4	11,3	0,06
322.5°	7,7	5,1	10,8	0,03
h=85m	Velocidade horizontal (m/s)	Inclinação vertical (°)	Intensidade turbulenta (%)	Shear factor
105°	7,7	8,2	9,6	0,00
112.5°	8,1	8,1	10,0	-0,01
120°	7,8	7,9	10,4	-0,01
127.5°	8,1	7,4	9,4	0,00
135°	8,1	5,4	8,6	0,00
142.5°	8,0	4,1	10,4	0,06
285°	6,3	1,1	11,0	0,09
292.5	7,8	-0,6	11,2	0,08
300°	8,1	0,2	9,5	0,04
307.5°	8,4	1,7	10,3	0,06
315°	8,1	1,8	10,3	0,04
322.5°	7,8	4,6	10,5	0,02
h=126m	Velocidade horizontal (m/s)	Inclinação vertical (°)	Intensidade turbulenta (%)	Shear factor
105°	7,7	7,2	9,0	0,00
112.5°	8,0	6,9	9,1	-0,02
120°	7,7	6,8	9,7	-0,01
127.5°	8,0	6,6	9,0	0,00
135°	8,1	4,8	8,2	-0,02
142.5°	8,1	4,2	9,3	0,02
285°	6,5	1,2	10,5	0,11
292.5	8,0	-0,7	9,7	0,08
300°	8,3	0,3	8,7	0,03
307.5°	8,5	1,7	9,1	0,05
315°	8,3	1,8	9,4	0,03
322.5°	7,9	4,1	9,8	0,03

Tabela D.6: Valores pontuais para o aerogerador WTG 6

h=44m	Velocidade horizontal (m/s)	Inclinação vertical (°)	Intensidade turbulenta (%)	Shear factor
105°	5,6	-2,1	16,3	0,33
112.5°	5,9	-2,4	15,3	0,23
120°	5,3	-7,5	15,0	0,28
127.5°	5,7	-7,9	14,6	0,33
135°	2,9	-6,9	32,3	1,17
142.5°	1,5	-5,9	73,8	1,94
285°	6,6	10,7	10,9	0,06
292.5	7,5	10,4	11,0	0,04
300°	7,2	10,3	10,3	0,04
307.5°	7,4	13,7	9,7	0,03
315°	7,2	11,9	9,8	0,05
322.5°	6,2	12,4	11,1	0,06
h=85m	Velocidade horizontal (m/s)	Inclinação vertical (°)	Intensidade turbulenta (%)	Shear factor
105°	6,7	-2,7	12,3	0,16
112.5°	6,5	-2,5	12,8	0,11
120°	6,1	-6,4	11,7	0,18
127.5°	6,7	-7,2	10,7	0,18
135°	5,1	-4,9	15,3	0,46
142.5°	4,3	-3,2	22,1	0,95
285°	6,9	10,5	11,0	0,06
292.5	7,7	10,2	10,3	0,04
300°	7,4	10,9	10,0	0,05
307.5°	7,6	12,7	9,5	0,03
315°	7,5	12,0	9,2	0,06
322.5°	6,4	12,4	10,9	0,08
h=126m	Velocidade horizontal (m/s)	Inclinação vertical (°)	Intensidade turbulenta (%)	Shear factor
105°	7,1	-2,9	11,1	0,13
112.5°	6,8	-2,9	11,9	0,10
120°	6,6	-5,6	10,8	0,19
127.5°	7,2	-6,5	9,7	0,15
135°	6,0	-3,9	12,6	0,33
142.5°	5,9	-2,0	14,4	0,54
285°	7,0	9,9	10,6	0,06
292.5	7,8	9,7	9,4	0,03
300°	7,5	10,7	9,4	0,06
307.5°	7,7	11,7	9,0	0,03
315°	7,7	11,6	8,4	0,07
322.5°	6,6	12,0	10,4	0,09

Tabela D.7: Valores pontuais para o aerogerador WTG 7

h=44m	Velocidade horizontal (m/s)	Inclinação vertical (°)	Intensidade turbulenta (%)	Shear factor
105°	5,7	1,6	17,6	0,27
112.5°	5,8	1,7	18,2	0,29
120°	5,6	-2,0	16,9	0,22
127.5°	5,6	-2,6	16,5	0,24
135°	3,9	-4,9	24,5	0,57
142.5°	3,2	-3,6	31,4	0,68
285°	6,5	7,7	8,3	0,02
292.5	7,7	8,8	10,7	0,06
300°	7,4	8,3	9,5	0,04
307.5°	7,5	8,9	10,5	0,05
315°	7,2	11,3	10,2	0,04
322.5°	6,0	7,6	12,5	0,07
h=85m	Velocidade horizontal (m/s)	Inclinação vertical (°)	Intensidade turbulenta (%)	Shear factor
105°	6,7	0,1	12,2	0,17
112.5°	6,8	0,9	13,0	0,16
120°	6,3	-2,4	13,5	0,13
127.5°	6,4	-3,5	12,5	0,17
135°	5,5	-4,4	15,0	0,35
142.5°	4,8	-3,5	19,2	0,51
285°	6,6	8,5	8,8	0,02
292.5	8,0	9,0	9,4	0,04
300°	7,6	8,9	9,2	0,03
307.5°	7,8	9,3	9,9	0,05
315°	7,4	11,0	9,8	0,04
322.5°	6,3	8,8	11,9	0,08
h=126m	Velocidade horizontal (m/s)	Inclinação vertical (°)	Intensidade turbulenta (%)	Shear factor
105°	7,1	-0,6	10,5	0,11
112.5°	7,2	0,1	11,2	0,10
120°	6,6	-3,0	12,1	0,12
127.5°	6,9	-4,1	11,1	0,15
135°	6,2	-4,3	12,1	0,26
142.5°	5,8	-3,4	14,8	0,39
285°	6,6	8,7	9,0	0,03
292.5	8,2	8,5	8,1	0,02
300°	7,7	8,9	8,7	0,02
307.5°	7,9	9,1	9,0	0,04
315°	7,5	10,5	9,1	0,04
322.5°	6,5	9,2	11,0	0,08

Tabela D.8: Valores pontuais para o aerogerador WTG 8

h=44m	Velocidade horizontal (m/s)	Inclinação vertical (°)	Intensidade turbulenta (%)	Shear factor
105°	5,6	1,9	17,6	0,19
112.5°	5,5	5,6	20,1	0,30
120°	5,1	1,5	20,5	0,33
127.5°	5,1	1,0	20,3	0,30
135°	4,9	-1,9	19,0	0,28
142.5°	4,3	-3,4	22,8	0,36
285°	6,5	3,7	10,1	0,05
292.5	7,3	3,1	10,3	0,07
300°	6,9	3,7	10,3	0,06
307.5°	7,1	3,3	11,4	0,08
315°	6,7	4,6	11,1	0,06
322.5°	5,8	4,1	13,1	0,09
h=85m	Velocidade horizontal (m/s)	Inclinação vertical (°)	Intensidade turbulenta (%)	Shear factor
105°	6,4	1,0	13,5	0,16
112.5°	6,6	3,0	14,2	0,22
120°	6,2	0,4	14,7	0,20
127.5°	6,0	-0,5	15,0	0,20
135°	5,8	-3,3	14,2	0,21
142.5°	5,4	-3,8	16,9	0,29
285°	6,7	5,1	10,2	0,03
292.5	7,7	4,5	9,4	0,07
300°	7,3	5,2	9,9	0,07
307.5°	7,5	4,7	10,6	0,08
315°	7,0	6,1	10,6	0,06
322.5°	6,2	6,1	12,3	0,10
h=126m	Velocidade horizontal (m/s)	Inclinação vertical (°)	Intensidade turbulenta (%)	Shear factor
105°	6,8	0,2	11,6	0,13
112.5°	7,1	1,3	11,4	0,14
120°	6,7	-0,7	12,4	0,14
127.5°	6,5	-1,5	12,9	0,16
135°	6,3	-4,1	12,1	0,18
142.5°	6,0	-4,2	14,2	0,25
285°	6,7	5,9	10,0	0,01
292.5	7,9	5,1	8,4	0,04
300°	7,4	5,9	9,3	0,06
307.5°	7,7	5,6	9,5	0,07
315°	7,1	6,8	9,9	0,05
322.5°	6,4	7,0	11,3	0,09

Tabela D.9: Valores pontuais para o aerogerador WTG 9

h=44m	Velocidade horizontal (m/s)	Inclinação vertical (°)	Intensidade turbulenta (%)	Shear factor
105°	6,9	6,4	10,4	0,05
112.5°	8,0	6,0	9,8	0,04
120°	7,7	6,6	9,5	0,04
127.5°	7,6	7,4	10,1	0,04
135°	7,3	5,4	11,1	0,04
142.5°	7,1	3,6	11,7	0,08
285°	5,9	1,1	14,2	0,10
292.5	6,9	0,7	13,8	0,13
300°	7,3	0,5	12,3	0,08
307.5°	7,8	1,2	12,1	0,08
315°	7,8	-0,2	10,7	0,06
322.5°	8,3	3,5	8,5	0,04
h=85m	Velocidade horizontal (m/s)	Inclinação vertical (°)	Intensidade turbulenta (%)	Shear factor
105°	7,1	6,3	10,3	0,05
112.5°	8,2	6,4	8,9	0,01
120°	7,8	6,5	9,2	0,01
127.5°	7,8	7,0	9,7	0,01
135°	7,5	5,3	11,0	0,02
142.5°	7,5	4,1	11,0	0,05
285°	6,2	2,1	12,3	0,06
292.5	7,4	1,3	11,5	0,09
300°	7,6	1,5	11,2	0,06
307.5°	8,2	2,0	11,1	0,05
315°	8,1	1,4	10,1	0,03
322.5°	8,4	3,7	8,5	0,00
h=126m	Velocidade horizontal (m/s)	Inclinação vertical (°)	Intensidade turbulenta (%)	Shear factor
105°	7,3	6,0	9,7	0,05
112.5°	8,2	6,0	8,1	-0,02
120°	7,8	6,0	8,7	-0,01
127.5°	7,8	6,3	9,2	0,00
135°	7,5	4,9	10,6	0,00
142.5°	7,6	4,0	10,4	0,03
285°	6,4	2,3	11,3	0,06
292.5	7,7	1,2	10,1	0,07
300°	7,8	1,6	10,3	0,06
307.5°	8,4	2,0	9,9	0,04
315°	8,2	1,8	9,3	0,01
322.5°	8,4	3,6	8,2	-0,01

Tabela D.10: Valores pontuais para o aerogerador WTG 10

h=44m	Velocidade horizontal (m/s)	Inclinação vertical (°)	Intensidade turbulenta (%)	Shear factor
105°	7,0	5,6	10,5	0,04
112.5°	7,2	1,2	10,9	0,06
120°	7,7	9,7	9,7	0,04
127.5°	7,3	6,4	9,9	0,06
135°	7,0	5,3	11,9	0,07
142.5°	7,0	4,5	11,5	0,07
285°	6,3	2,8	14,2	0,12
292.5	6,5	2,9	13,6	0,12
300°	7,4	2,5	12,3	0,08
307.5°	8,0	2,3	11,6	0,06
315°	8,1	2,1	9,5	0,04
322.5°	8,3	5,4	8,9	0,02
h=85m	Velocidade horizontal (m/s)	Inclinação vertical (°)	Intensidade turbulenta (%)	Shear factor
105°	7,2	6,0	10,4	0,04
112.5°	7,5	3,4	10,4	0,05
120°	7,8	8,8	9,1	0,02
127.5°	7,5	6,7	9,4	0,04
135°	7,4	5,9	11,2	0,07
142.5°	7,3	4,8	10,9	0,06
285°	6,8	3,1	12,3	0,09
292.5	7,1	3,1	11,9	0,10
300°	7,7	3,0	11,3	0,06
307.5°	8,3	2,8	10,8	0,04
315°	8,2	2,7	9,2	0,01
322.5°	8,3	5,0	8,8	0,00
h=126m	Velocidade horizontal (m/s)	Inclinação vertical (°)	Intensidade turbulenta (%)	Shear factor
105°	7,3	5,8	9,8	0,04
112.5°	7,7	4,5	9,5	0,02
120°	7,9	7,5	8,5	0,00
127.5°	7,6	6,3	8,7	0,02
135°	7,5	5,6	10,4	0,05
142.5°	7,4	4,5	10,3	0,05
285°	7,0	2,9	11,0	0,07
292.5	7,3	3,0	10,5	0,08
300°	7,9	2,9	10,2	0,05
307.5°	8,4	2,8	9,8	0,02
315°	8,2	2,8	8,8	-0,01
322.5°	8,3	4,5	8,5	-0,01

Tabela D.11: Valores pontuais para o aerogerador WTG 11

h=44m	Velocidade horizontal (m/s)	Inclinação vertical (°)	Intensidade turbulenta (%)	Shear factor
105°	7,1	7,3	10,1	0,04
112.5°	6,6	4,2	12,1	0,07
120°	7,9	8,5	9,1	0,03
127.5°	7,3	8,3	9,5	0,06
135°	7,1	7,2	11,1	0,06
142.5°	6,8	4,0	11,5	0,08
285°	6,6	1,0	13,7	0,12
292.5	6,3	1,8	12,9	0,11
300°	7,4	1,4	11,9	0,10
307.5°	7,9	1,4	10,6	0,06
315°	8,0	1,4	9,6	0,04
322.5°	8,2	4,5	9,1	0,02
h=85m	Velocidade horizontal (m/s)	Inclinação vertical (°)	Intensidade turbulenta (%)	Shear factor
105°	7,3	6,9	9,9	0,03
112.5°	6,9	5,6	11,5	0,09
120°	8,0	7,6	8,7	0,00
127.5°	7,5	7,4	9,0	0,04
135°	7,4	6,5	10,5	0,05
142.5°	7,2	4,0	10,8	0,07
285°	7,1	1,7	12,0	0,11
292.5	6,8	2,5	11,8	0,10
300°	7,9	2,3	10,8	0,08
307.5°	8,1	2,2	10,1	0,03
315°	8,2	2,2	9,2	0,01
322.5°	8,3	4,5	8,9	0,00
h=126m	Velocidade horizontal (m/s)	Inclinação vertical (°)	Intensidade turbulenta (%)	Shear factor
105°	7,4	6,2	9,4	0,03
112.5°	7,2	5,9	10,6	0,08
120°	8,0	6,5	8,2	-0,02
127.5°	7,6	6,3	8,3	0,03
135°	7,5	5,6	9,8	0,04
142.5°	7,4	3,8	9,9	0,06
285°	7,4	1,8	10,5	0,08
292.5	7,1	2,7	10,7	0,09
300°	8,1	2,4	9,7	0,05
307.5°	8,2	2,4	9,4	0,01
315°	8,2	2,4	8,8	-0,01
322.5°	8,2	4,1	8,5	-0,01

Tabela D.12: Valores pontuai para o aerogerador WTG 12

h=44m	Velocidade horizontal (m/s)	Inclinação vertical (°)	Intensidade turbulenta (%)	Shear factor
105°	7,1	7,8	9,8	0,05
112.5°	6,0	7,4	12,6	0,09
120°	7,6	6,0	9,7	0,02
127.5°	7,5	7,0	9,5	0,04
135°	6,9	4,2	10,5	0,06
142.5°	6,7	1,8	11,4	0,07
285°	6,6	-0,7	12,9	0,12
292.5	6,4	0,2	11,7	0,09
300°	7,4	0,2	11,1	0,09
307.5°	7,3	1,3	10,7	0,07
315°	7,7	0,7	9,7	0,04
322.5°	7,8	4,2	9,1	0,03
h=85m	Velocidade horizontal (m/s)	Inclinação vertical (°)	Intensidade turbulenta (%)	Shear factor
105°	7,3	7,3	9,6	0,03
112.5°	6,4	7,3	12,4	0,10
120°	7,7	5,7	9,5	0,01
127.5°	7,7	6,0	8,9	0,02
135°	7,2	4,3	9,9	0,05
142.5°	7,0	2,0	10,6	0,07
285°	7,1	0,1	11,4	0,12
292.5	6,8	1,0	11,0	0,09
300°	7,9	0,9	10,1	0,08
307.5°	7,6	1,9	10,3	0,05
315°	7,9	1,8	9,5	0,02
322.5°	7,9	3,9	9,1	0,02
h=126m	Velocidade horizontal (m/s)	Inclinação vertical (°)	Intensidade turbulenta (%)	Shear factor
105°	7,4	6,6	9,1	0,03
112.5°	6,7	6,7	11,7	0,10
120°	7,7	4,9	9,0	0,00
127.5°	7,7	4,9	8,2	0,01
135°	7,3	3,9	9,2	0,04
142.5°	7,2	1,9	9,7	0,06
285°	7,5	0,4	10,1	0,09
292.5	7,0	1,3	10,3	0,08
300°	8,1	1,2	9,3	0,05
307.5°	7,7	2,0	9,9	0,04
315°	8,0	2,2	9,0	0,01
322.5°	8,0	3,7	8,9	0,02

Tabela D.13: Valores pontuais para o aerogerador WTG 13

h=44m	Velocidade horizontal (m/s)	Inclinação vertical (°)	Intensidade turbulenta (%)	Shear factor
105°	6,7	2,9	9,9	0,07
112.5°	5,8	1,0	11,9	0,11
120°	6,8	-1,0	10,6	0,07
127.5°	7,0	-3,2	9,9	0,07
135°	6,3	-4,2	10,7	0,10
142.5°	5,9	-4,1	12,2	0,10
285°	6,4	1,6	12,8	0,12
292.5	6,6	3,8	11,8	0,07
300°	7,5	3,0	11,1	0,07
307.5°	7,1	5,2	11,0	0,04
315°	7,4	5,1	9,7	0,04
322.5°	7,2	4,9	9,8	0,05
h=85m	Velocidade horizontal (m/s)	Inclinação vertical (°)	Intensidade turbulenta (%)	Shear factor
105°	7,0	3,4	9,6	0,07
112.5°	6,3	2,1	11,7	0,12
120°	7,2	0,1	10,3	0,08
127.5°	7,3	-2,2	9,5	0,06
135°	6,8	-2,8	9,9	0,11
142.5°	6,4	-3,2	11,4	0,12
285°	6,9	2,0	11,3	0,10
292.5	6,9	3,6	11,2	0,06
300°	7,8	3,1	10,4	0,06
307.5°	7,3	4,6	10,9	0,04
315°	7,6	4,8	9,6	0,03
322.5°	7,5	4,9	9,7	0,05
h=126m	Velocidade horizontal (m/s)	Inclinação vertical (°)	Intensidade turbulenta (%)	Shear factor
105°	7,2	3,5	9,1	0,05
112.5°	6,6	2,6	11,2	0,12
120°	7,4	0,8	9,7	0,06
127.5°	7,5	-1,5	8,9	0,04
135°	7,1	-1,8	9,1	0,10
142.5°	6,7	-2,5	10,4	0,12
285°	7,1	2,1	10,2	0,07
292.5	7,1	3,2	10,6	0,06
300°	8,0	2,9	9,6	0,05
307.5°	7,4	4,0	10,4	0,05
315°	7,6	4,4	9,3	0,03
322.5°	7,6	4,8	9,3	0,05

Apêndice E

Erros relativos e tamanho das amostras tabelados

Tabela E.1: Erros relativos e tamanho das amostras para direcções Sudeste, com estação de referência assinalada a azul

Dir:	105°	Vh (m/s)	Dir (°)	It (%)	Vh_med (m/s)	Dir_med (°)	It_med (%)	Er_Vh (%)	Er_Dir (%)	Er_It (%)
30 m A=196	P042	7,46	292,81	9,41	8,29	283,13	13,05	-10,01	3,42	-27,88
	P384	4,84	272,42	16,78	4,84	272,44	16,40	0,13	-0,01	2,35
	P385	7,06	292,87	9,88	7,24	298,15	12,89	-2,54	-1,77	-23,33
60 m A=212	P384	5,37	273,58	16,12	5,33	273,77	15,61	0,74	-0,07	3,30
	P385	7,26	292,44	9,91	7,16	294,81	12,95	1,38	-0,80	-23,46
Dir:	112.5°	Vh (m/s)	Dir (°)	It (%)	Vh_med (m/s)	Dir_med (°)	It_med (%)	Er_Vh (%)	Er_Dir (%)	Er_It (%)
30 m A=256	P042	7,44	299,47	10,15	7,84	289,33	12,43	-5,20	3,50	-18,36
	P384	3,94	277,65	21,16	3,93	277,88	17,62	0,28	-0,08	20,05
	P385	5,88	302,45	13,31	7,10	301,27	11,67	-17,11	0,39	14,12
60 m A=290	P384	4,50	278,95	20,10	4,53	278,67	16,20	-0,66	0,10	24,09
	P385	6,31	301,68	12,91	6,94	297,97	12,26	-9,04	1,25	5,30
Dir:	120°	Vh (m/s)	Dir (°)	It (%)	Vh_med (m/s)	Dir_med (°)	It_med (%)	Er_Vh (%)	Er_Dir (%)	Er_It (%)
30 m A=403	P042	7,76	303,08	9,15	8,20	297,42	12,14	-5,38	1,90	-24,60
	P384	4,92	289,25	18,27	4,97	289,80	17,88	-0,99	-0,19	2,14
	P385	7,79	308,85	9,15	7,88	306,21	11,55	-1,21	0,86	-20,75
60 m A=475	P384	5,51	290,15	17,13	5,54	290,60	15,11	-0,54	-0,15	13,32
	P385	7,93	308,40	9,03	7,97	302,89	11,12	-0,55	1,82	-18,79
Dir:	127.5°	Vh (m/s)	Dir (°)	It (%)	Vh_med (m/s)	Dir_med (°)	It_med (%)	Er_Vh (%)	Er_Dir (%)	Er_It (%)
30 m A=355	P042	9,09	306,95	6,73	8,00	297,57	11,59	13,59	3,15	-41,90
	P384	4,62	287,52	19,19	4,64	287,51	17,52	-0,31	0,01	9,55
	P385	7,28	312,45	9,64	7,69	306,93	11,37	-5,32	1,80	-15,20
60 m A=477	P384	5,17	289,22	18,07	5,15	289,68	15,78	0,48	-0,16	14,48
	P385	7,56	312,07	9,26	7,56	303,38	11,36	-0,12	2,86	-18,50
Dir:	135°	Vh (m/s)	Dir (°)	It (%)	Vh_med (m/s)	Dir_med (°)	It_med (%)	Er_Vh (%)	Er_Dir (%)	Er_It (%)
30 m A=498	P042	8,60	311,13	8,08	7,65	291,87	11,21	12,43	6,60	-27,89
	P384	3,56	304,54	25,60	3,58	304,52	20,31	-0,65	0,01	26,06
	P385	6,83	318,24	10,97	7,44	308,16	10,65	-8,16	3,27	3,06
60 m A=652	P384	4,10	305,99	24,17	4,06	305,36	16,72	0,84	0,21	44,54
	P385	7,14	318,62	10,67	6,95	308,50	10,48	2,73	3,28	1,82
Dir:	142.5°	Vh (m/s)	Dir (°)	It (%)	Vh_med (m/s)	Dir_med (°)	It_med (%)	Er_Vh (%)	Er_Dir (%)	Er_It (%)
30 m A=408	P042	7,46	292,81	9,41	8,29	283,13	13,05	-10,01	3,42	-27,88
	P384	4,84	272,42	16,78	4,84	272,44	16,40	0,13	-0,01	2,35
	P385	7,06	292,87	9,88	7,24	298,15	12,89	-2,54	-1,77	-23,33
60 m A=457	P384	5,37	273,58	16,12	5,33	273,77	15,61	0,74	-0,07	3,30
	P385	7,26	292,44	9,91	7,16	294,81	12,95	1,38	-0,80	-23,46

Tabela E.2: Erros relativos e tamanho das amostras para direcções Noroeste, com estação de referência assinalada a azul

Dir:	285º	Vh (m/s)	Dir (º)	It (%)	Vh_med (m/s)	Dir_med (º)	It_med (%)	Er_Vh (%)	Er_Dir (%)	Er_It (%)
30 m	P042	7,43	121,03	10,72	7,63	126,56	10,33	-2,62	-4,37	3,77
	P384	6,55	96,96	8,21	6,49	96,73	15,54	0,89	0,23	-47,17
	A=89	P385	6,47	115,38	13,61	7,41	135,94	11,55	-12,67	-15,13
60 m	P384	6,61	98,16	8,56	6,68	98,87	14,11	-0,99	-0,71	-39,33
A=97	P385	6,98	113,15	12,60	7,07	130,03	12,51	-1,33	-12,98	0,73
Dir:	292.5º	Vh (m/s)	Dir (º)	It (%)	Vh_med (m/s)	Dir_med (º)	It_med (%)	Er_Vh (%)	Er_Dir (%)	Er_It (%)
30 m	P042	7,00	126,22	12,05	7,53	124,03	10,59	-7,13	1,77	13,73
	P384	6,21	104,13	9,32	6,24	104,60	16,03	-0,54	-0,44	-41,84
	A=99	P385	6,26	120,17	12,27	7,07	133,09	11,77	-11,54	-9,71
60 m	P384	6,43	105,59	9,68	6,51	105,51	13,83	-1,18	0,07	-29,98
A=140	P385	6,62	118,02	11,81	6,82	135,04	13,20	-2,94	-12,61	-10,54
Dir:	300º	Vh (m/s)	Dir (º)	It (%)	Vh_med (m/s)	Dir_med (º)	It_med (%)	Er_Vh (%)	Er_Dir (%)	Er_It (%)
30 m	P042	7,58	128,48	10,41	7,70	126,80	11,51	-1,46	1,32	-9,55
	P384	6,49	112,40	9,86	6,46	112,53	14,96	0,51	-0,12	-34,08
	A=112	P385	7,37	124,43	11,48	7,01	140,92	11,92	5,16	-11,70
60 m	P384	6,83	113,53	9,74	6,85	113,57	12,64	-0,27	-0,03	-22,95
A=198	P385	7,79	123,01	10,92	7,01	138,47	12,34	11,21	-11,17	-11,50
Dir:	307.5º	Vh (m/s)	Dir (º)	It (%)	Vh_med (m/s)	Dir_med (º)	It_med (%)	Er_Vh (%)	Er_Dir (%)	Er_It (%)
30 m	P042	7,80	131,34	10,25	7,84	124,89	11,69	-0,51	5,16	-12,31
	P384	6,20	115,57	9,98	6,11	115,78	14,70	1,44	-0,18	-32,10
	A=119	P385	7,62	126,96	10,35	6,79	138,71	12,47	12,21	-8,47
60 m	P384	6,52	117,58	9,91	6,57	117,58	12,83	-0,69	0,00	-22,76
A=185	P385	7,89	126,10	10,18	6,77	142,92	12,57	16,66	-11,77	-19,03
Dir:	315º	Vh (m/s)	Dir (º)	It (%)	Vh_med (m/s)	Dir_med (º)	It_med (%)	Er_Vh (%)	Er_Dir (%)	Er_It (%)
30 m	P042	8,85	133,25	8,77	7,17	128,56	11,30	23,49	3,65	-22,34
	P384	5,95	124,63	9,90	5,95	124,69	15,05	0,10	-0,04	-34,22
	A=166	P385	7,95	131,89	9,46	6,70	144,16	12,36	18,62	-8,51
60 m	P384	6,24	125,97	9,85	6,22	125,55	13,85	0,30	0,33	-28,85
A=225	P385	8,11	131,68	9,44	6,65	145,72	12,15	21,92	-9,64	-22,25
Dir:	322.5º	Vh (m/s)	Dir (º)	It (%)	Vh_med (m/s)	Dir_med (º)	It_med (%)	Er_Vh (%)	Er_Dir (%)	Er_It (%)
30 m	P042	8,41	135,69	9,21	7,01	130,57	10,45	19,84	3,92	-11,91
	P384	5,90	132,65	10,06	5,94	132,45	14,85	-0,62	0,15	-32,22
	A=181	P385	8,11	136,82	8,91	6,69	146,65	12,17	21,23	-6,70
60 m	P384	6,19	133,91	9,91	6,23	133,45	14,80	-0,65	0,35	-33,07
A=182	P385	8,17	136,99	8,98	6,61	149,28	12,29	23,52	-8,24	-26,91

Tabela E.3: Erros absolutos e dimensões das amostras para cada direcção

		P384	P385	Amostra P384	Amostra P385
Sudeste	105°	0,11	0,09	212	640
	112.5°	0,12	0,20	290	1062
	120°	0,10	0,11	475	741
	127.5°	0,09	0,15	477	675
	135°	0,03	0,16	652	460
	142.5°	0,01	0,15	457	188
Noroeste	285°	-0,06	0,10	97	40
	292.5°	-0,01	0,08	140	104
	300°	0,00	0,06	198	127
	307.5°	-0,01	0,03	185	173
	315°	-0,02	0,02	225	185
	322.5°	0,00	0,01	282	240

Apêndice F

Apresentação dos dados meteorológicos

Estação P042

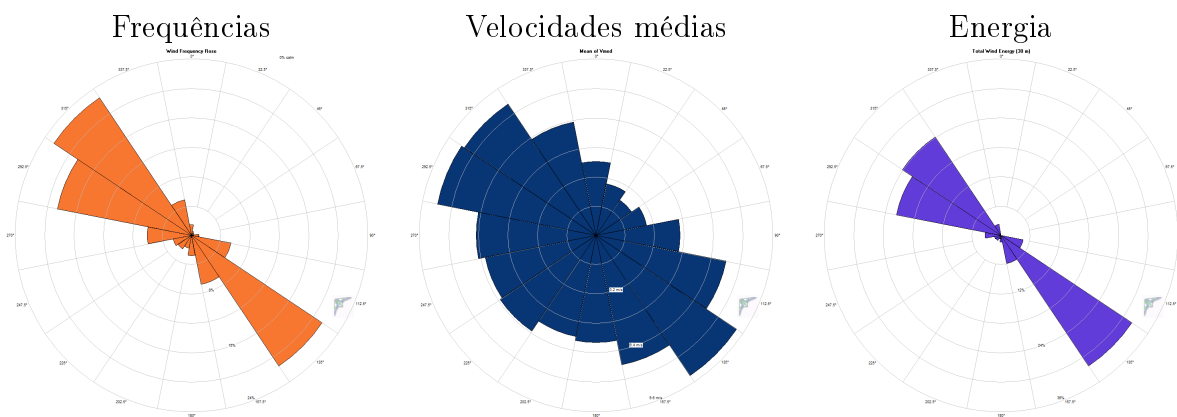


Figura F.1: Rosas dos ventos da P042 para 30 metros de altura

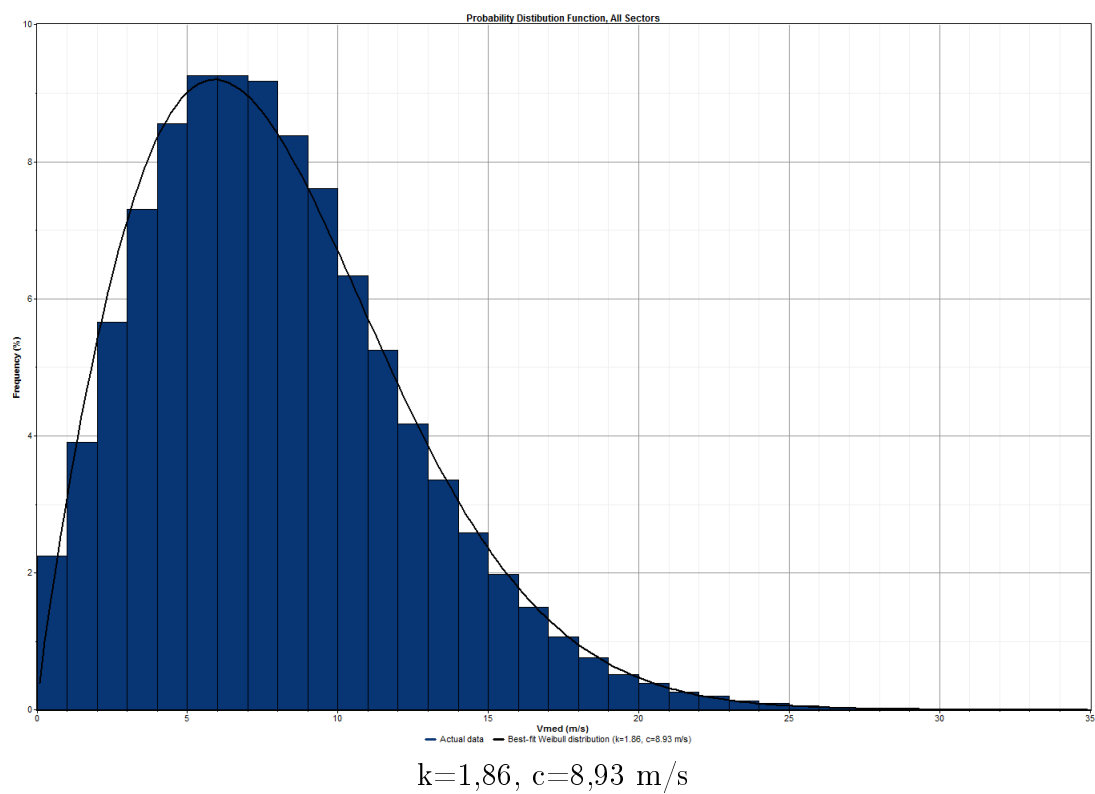


Figura F.2: Histograma da P042

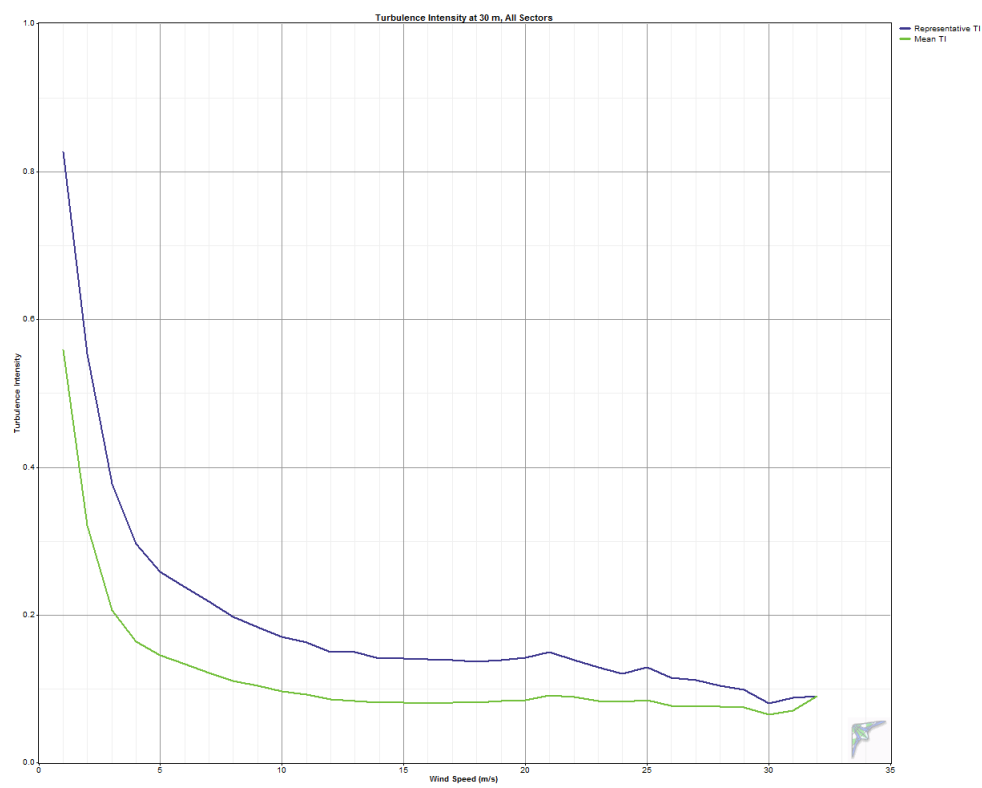


Figura F.3: Intensidade turbulenta em função da velocidade média para P042 a 30 metros de altura

Estação P384

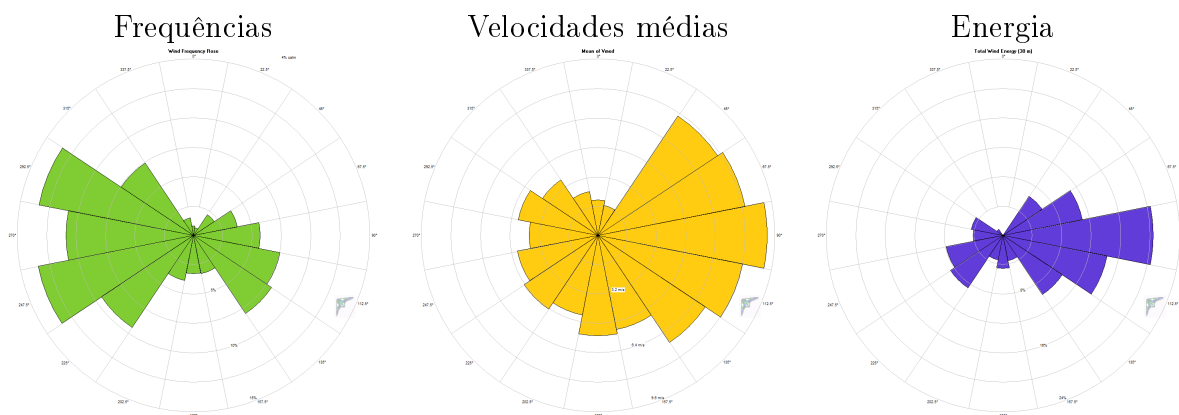


Figura F.4: Rosas dos ventos da P384 para 30 metros de altura

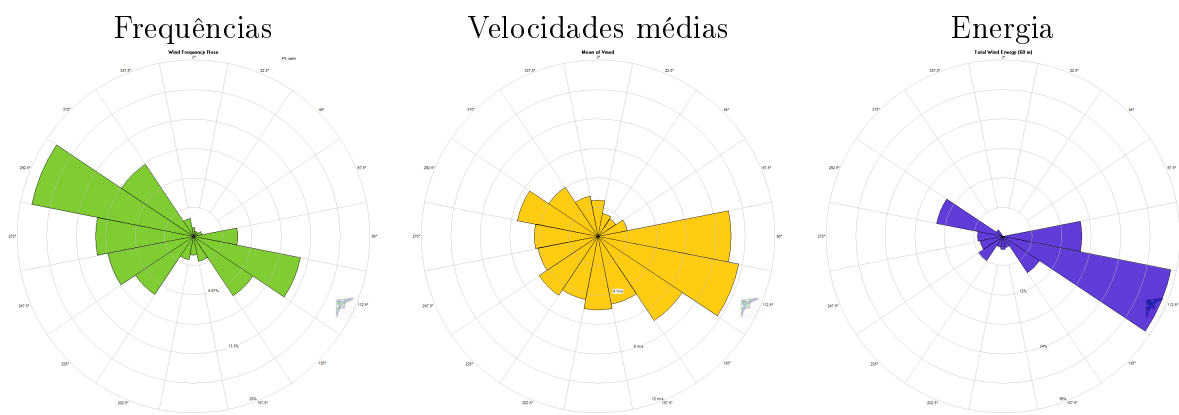


Figura F.5: Rosas dos ventos da P384 para 60 metros de altura

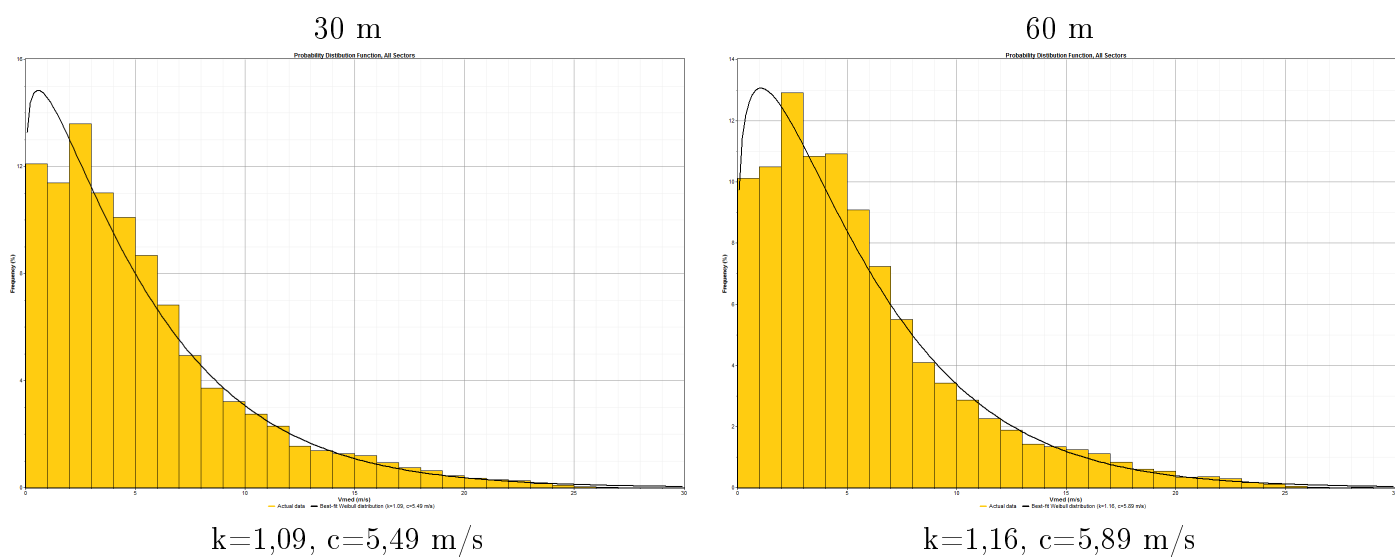


Figura F.6: Histogramas da P384

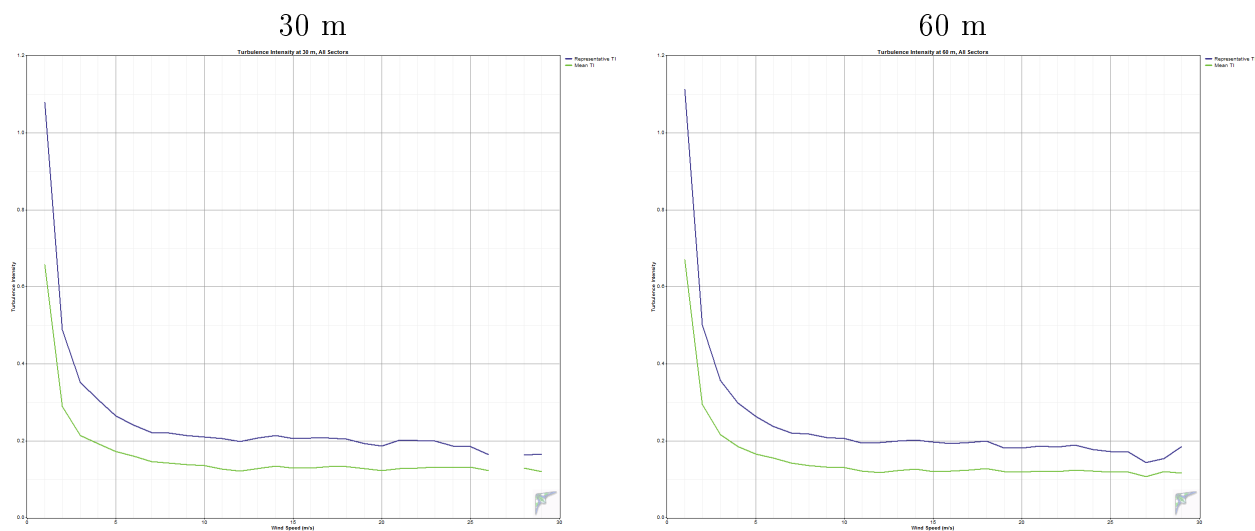


Figura F.7: Intensidade turbulenta em função da velocidade média na P384

Estação P385

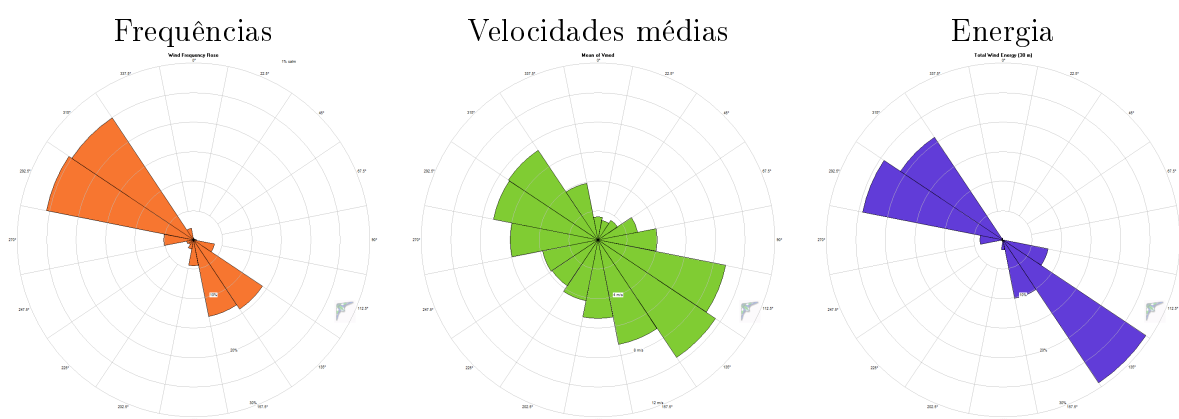


Figura F.8: Rosas dos ventos da P385 para 30 metros de altura

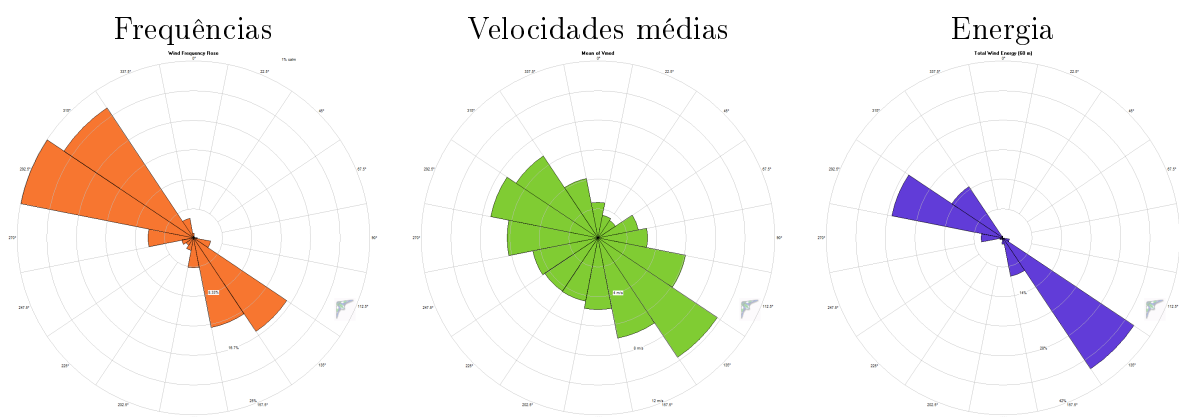


Figura F.9: Rosas dos ventos da P385 para 60 metros de altura

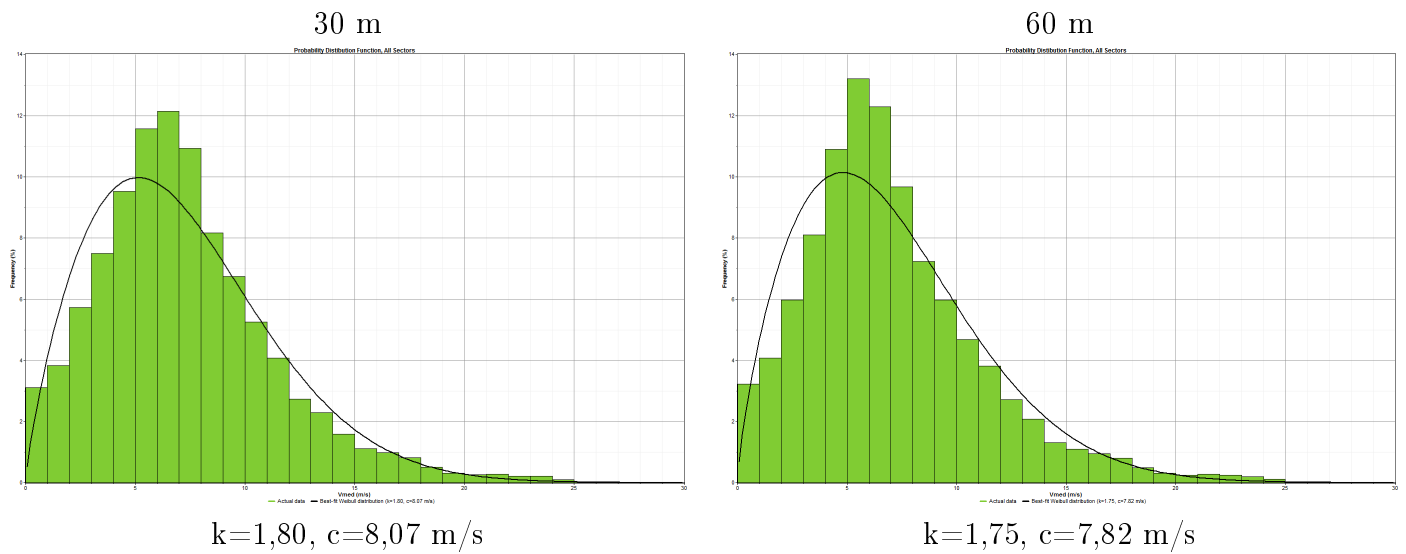


Figura F.10: Histogramas da P385

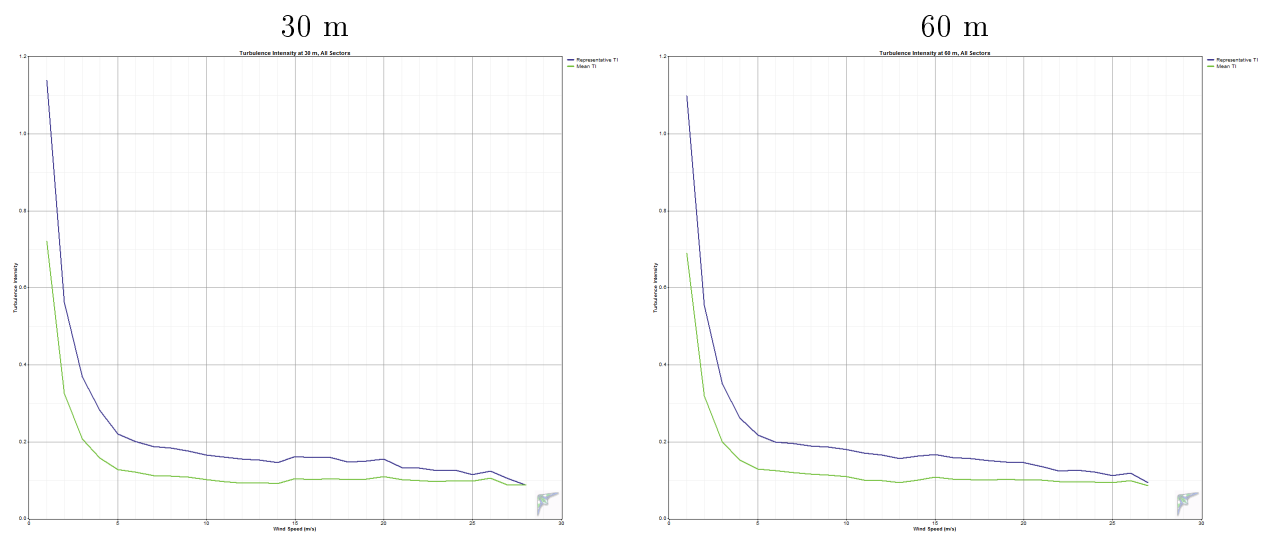


Figura F.11: Intensidade turbulenta em função da velocidade média na P385